

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Análisis de estrategias para el cálculo de estructuras laminares de material compuesto

Autor: Manuel Rodríguez Rodríguez

Tutor: Antonio Manuel Blázquez Gámez

Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Análisis de estrategias para el cálculo de estructuras laminares de material compuesto

Autor:

Manuel Rodríguez Rodríguez

Tutor:

Antonio Manuel Blázquez Gámez

Catedrático de Universidad

Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Análisis de estrategias para el cálculo de estructuras laminares de material compuesto

Autor: Manuel Rodríguez Rodríguez
Tutor: Antonio Manuel Blázquez Gámez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

*A mi familia,
A mis amigos,
gracias por todo.*

Agradecimientos

El presente proyecto no habría sido posible, a nivel técnico, sin la colaboración y supervisión de mi tutor, Antonio Blázquez Gámez. A lo largo de estos meses que he trabajado con él, ha demostrado su profesionalidad y competencia, así como su compromiso con su labor educativa, estando siempre dispuesto a reunirse y transmitir sus conocimientos con pasión, sin importar si las reuniones duraban varias horas. También destacar su iniciativa de hablar con Dassault Systems para conseguir una versión gratuita provisional y así permitirme desarrollar este proyecto, empresa gracias a la cuál este proyecto también ha podido ser desarrollado con éxito.

Por otro lado, a nivel personal y hablando desde el corazón, agradecer a mi familia su amor incondicional, su confianza en mis capacidades, y en concreto a mi padre, por ser un ejemplo único de esfuerzo, sacrificio y trabajo incansable. Siempre estuvieron dispuestos a escucharme y a apoyarme en mis momentos duros. Por último, agradecer a mis amigos todos los buenos momentos que hemos pasado, ellos han hecho que estos 4 años hayan sido inolvidables.

Manuel Rodríguez Rodríguez

Sevilla, 2020

Resumen

Este documento presenta distintas estrategias de modelado de un panel rigidizado *monostinger* con run-out fabricado en su totalidad con material compuesto, así como los resultados de cada modelo realizado.

El objetivo es mostrar las ventajas, inconvenientes y posibilidades de los elementos *standard shell*, *continuum shell* y *continuum solid shell* implementados en el software ABAQUS.

El estudio se completa corroborándose los resultados obtenidos de manera numérica con los resultados experimentales de un ensayo de tracción realizado sobre la probeta modelada.

Abstract

This document presents different strategies of modeling a monostringer panel with runout fully crafted with composite material, as well as the results of each model analysed.

The objective is to reveal the advantages, disadvantages and possibilities of *standard shell*, *continuum shell* and *continuum solid shell* elements implemented in the software ABAQUS.

The investigation is finished corroborating the results obtained numerically with the experimental ones obtained in a stress laboratory test of the modeled panel.

Índice

<i>Resumen</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Introducción	1
1.3 Preliminares	3
1.4 Objetivo	7
1.5 Metodología	7
1.6 Contenido	10
2 MODELOS CON STANDARD SHELL	11
2.1 Descripción de los modelos	12
2.2 Convergencia del mallado	14
2.3 Resultados	16
2.3.1 Desplazamientos	16
2.3.2 Deformaciones	18
2.3.3 Tensiones	24
3 MODELOS CON CONTINUUM SHELL	29
3.1 Descripción de los modelos	29
3.2 Resultados	31
3.2.1 Desplazamientos	31
3.2.2 Deformaciones	33
3.2.3 Tensiones	41
4 MODELOS CON CONTINUUM SOLID SHELL	47
4.1 Descripción de los modelos	47
4.2 Resultados	47
4.2.1 Desplazamientos	47
4.2.2 Deformaciones	49
4.2.3 Tensiones	60
5 CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO	67
5.1 Resumen	67
5.2 Conclusiones	67
5.2.1 Conclusiones sobre el modelado	67
5.2.2 Conclusiones sobre los resultados	68
5.3 Desarrollos futuros	69
<i>Índice de Figuras</i>	71

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

El presente proyecto se enmarca en la normativa de Trabajo Fin de Grado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, incluida dentro del plan de estudios del Grado en Ingeniería Aeroespacial del año 2010. Se realiza con el objetivo de obtener los 12 créditos ECTS referidos a la asignatura “Trabajo Fin de Grado”, y así completar los 240 créditos ECTS para la obtención del título de Graduado en Ingeniería Aeroespacial.

Este documento se desarrolla en el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, más concretamente con el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM). El tutor encargado de su dirección ha sido el Dr. Antonio Blázquez Gámez.

1.2 Introducción

En la industria aeronáutica una de las principales filosofías de trabajo es la reducción del peso de la aeronave manteniendo o mejorando la resistencia estructural y la seguridad de la misma. Este enfoque es fundamental ya que reduce los costes asociados a la operación del avión, mejorando la competitividad del mismo y haciéndolo un medio de transporte más accesible, económico y seguro para la población.

A lo largo de la historia de la aviación se ha ido diseñando y mejorando la estructura de las aeronaves, que es fundamental tanto para transmitir y soportar cargas como para mantener la forma externa y la aerodinámica. La estructura del avión está formada por el fuselaje, las alas y las superficies de control.

En un comienzo se optó por estructuras reticuladas, cuyo fuselaje está formado por un conjunto de barras que soportan toda la carga, y sobre éste se instala un revestimiento fabricado con tela. Este tipo de estructuras se sigue utilizando para aviones ligeros como el Piper PA-18, cuyo cuerpo del fuselaje y estabilizador vertical se muestra en la figura 1.1.

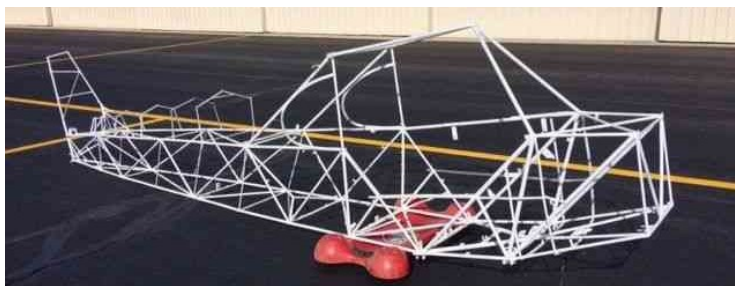


Figura 1.1 Estructura reticular para formar el fuselaje y el estabilizador vertical del Piper PA-18.

Fuente: <https://sky4buy.com/Piper-PA-18-150-Super-Cub-Fuselage-PA-11292339446638/013066> obtenida el 09/08/2020.

Sin embargo, con el transcurso de los años las exigencias operacionales y por tanto estructurales del avión fueron en aumento. Así, se investigaron y diseñaron nuevos tipos de estructuras para las aeronaves, entre las que destacan la monocasco y la semimonocasco.

En la estructura monocasco, el revestimiento del fuselaje es muy grueso y soporta las cargas del avión. Al estar construido con láminas, estas no soportan eficientemente los esfuerzos de compresión, por lo que para evitar el fallo por pandeo se debe utilizar un revestimiento de gran espesor, penalizando el peso de la aeronave. Por ello, para reducir dicho espesor el revestimiento del fuselaje se suele reforzar con cuadernas, obteniéndose el llamado fuselaje monocasco reforzado, cuya estructura se aprecia en la figura 1.2.

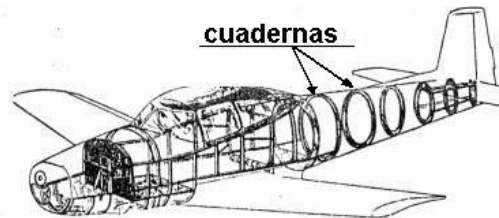


Figura 1.2 Esquema de avión con fuselaje monocasco reforzado, fuente: obtenida el 09/08/2020 en <https://docplayer.es/40121961-Area-estructuras-y-materiales.html>.

Por otro lado, en el fuselaje semimonocasco, presentado en la figura 1.3, se utiliza un revestimiento (skin) de láminas de bajo espesor, con refuerzos longitudinales (largueros y larguerillos) y transversales (cuadernas). Se puede ver como una evolución natural del fuselaje monocasco reforzado, y sus distintas partes se caracterizan por su forma y por su función:



Figura 1.3 Interior del fuselaje de un B787, fuente: dominio público.

- **Piel (skin):** Revestimiento que determina la geometría externa del fuselaje. Se encarga de absorber las cargas aerodinámicas y transmitir las a los larguerillos y las cuadernas.
- **Larguerillo (stiffener):** Barra rigidizadora que se coloca en la dirección longitudinal del fuselaje. Se diferencian de los largueros únicamente en su tamaño. No solo contribuyen a la transmisión de cargas de tracción y compresión, sino que subdivide el revestimiento en paneles más pequeños, incrementando la carga de pandeo de los paneles. Perfiles típicos son en forma de L (figura 1.4) y en forma de T (figura 1.5).



Figura 1.4 Perfil rigidizador en L.



Figura 1.5 Perfil rigidizador en T.

- **Cuaderna (frame):** Elemento estructural curvo que se coloca de forma transversal al fuselaje. Se une a la skin y a los larguerillos, da forma a la sección y, al igual que los larguerillos, contribuye a dividir la skin para aumentar la carga de pandeo.

En cuanto a los materiales empleados para construir la estructura, mientras que en los inicios se utilizaba madera, más tarde se empezó a emplear materiales ligeros como el aluminio. Un avance fundamental ocurrido en las últimas décadas que ha permitido revolucionar la aeronáutica es el desarrollo de los materiales compuestos.

Un material compuesto se puede definir como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material ¹. Entre las ventajas de este nuevo concepto se destaca lo siguiente:

- Gran versatilidad en el diseño, tanto en la elección de materiales como en la forma de combinarlos para formar una lámina, ya sea añadiendo el refuerzo en forma de fibra o partículas. También se fabrican laminados a partir de la unión de varias láminas, pudiéndose elegir en cada una la orientación de la fibra o combinar láminas reforzadas con fibras y láminas reforzadas con partículas.
- Propiedades fisicoquímicas únicas que no tienen sus componentes por separado. En concreto, es frecuente conseguir una reducción significativa del peso específico del material, consiguiéndose cocientes de resistencia/peso y rigidez/peso mucho mayores a los materiales convencionales.

Estas características hacen que su aplicación sea atractiva para la industria aeronáutica y para otras como puede ser la aeroespacial, la náutica, la automovilística, en la Fórmula 1 o en la construcción.

Así pues, uno de los rigidizadores empleados hoy en día en los aviones con estructura semimonocasco son los larguerillos de material compuesto en forma de T. Además, conforme se va reduciendo la sección del fuselaje desde la parte central a la cola la cantidad de larguerillos debe disminuir para así mantener la distancia óptima estipulada entre ellos. Es por ello por lo que resulta necesario rematar algunos larguerillos en sus extremos sin unirlos a una cuaderna, siendo habitual hacerlo mediante runout. Un ejemplo de runout puede verse en la figura 1.6.

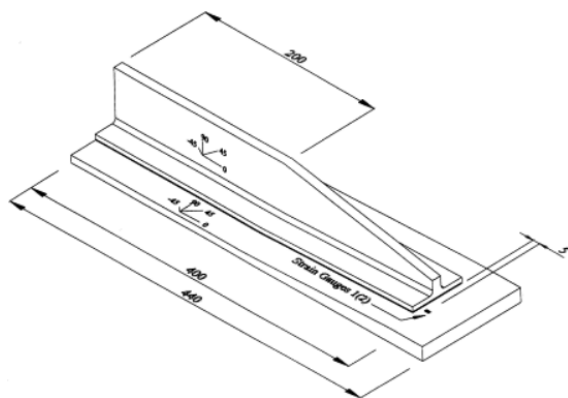


Figura 1.6 Esquema de un larguerillo en forma de T con runout que está adherido a una placa, fuente: artículo en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382230100006X>.

1.3 Preliminares

ABAQUS es un software de simulación que aplica el Método de los Elementos Finitos (MEF)² para realizar cálculos estructurales. En su versión 2019 existen tres tipos de elementos *shell* que se estudian en este documento, estos son, los *standard shell*, los *continuum shell* y los *continuum solid shell*.

¹ F. París, J.Cañas, J.C.Marín, A. Barroso, «Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos» Libro

² Método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Existen diversos manuales para la aplicación del MEF a los problemas de análisis estructural, como el de H. Friedel, «Structural Analysis with Finite Elements» Libro

A continuación se procede a hacer una descripción básica de estos 3 elementos, realizándose antes una introducción de las dos estrategias que utiliza ABAQUS para calcular la matriz de rigidez del elemento; la integración reducida y la integración completa.

► Integración reducida e integración completa

Para resolver el teorema de los trabajos virtuales y calcular los desplazamientos en los nodos a través del sistema de ecuaciones $\mathbf{F} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{u}$ es necesario calcular de forma numérica expresiones que involucran integrales, ya que estas aparecen en la expresión de la matriz de rigidez total \mathbf{k} del problema, que está íntimamente relacionada con la matriz de rigidez del elemento. Para esto último, ABAQUS puede usar la integración completa o la integración reducida.

En la integración reducida se tiene un punto menos de integración en cada dirección que los elementos de integración completa. Por ejemplo, en el caso de un elemento shell con 4 nodos, en la integración completa (figura 1.7) se tiene 4 puntos de integración, 2 coordenadas en la dirección x y 2 en la dirección y , sin embargo, en la integración reducida (figura 1.8) se tiene una sola coordenada x e y , es decir, un solo punto. Por tanto, al reducir el número de puntos de integración en el caso de la integración reducida se tienen menores tiempos de computación y se requiere menor almacenamiento en memoria debido a que ABAQUS sólo determina las deformaciones y las tensiones en dichos puntos.

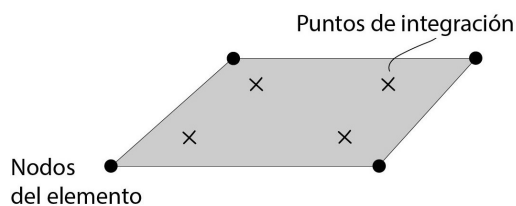


Figura 1.7 Integración completa.

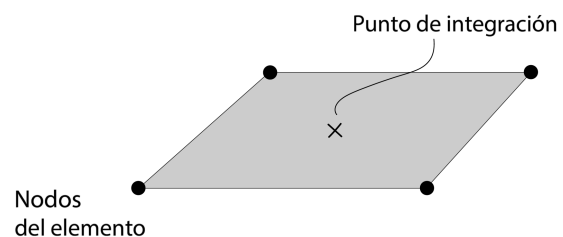


Figura 1.8 Integración reducida.

Por contra, al aplicar integración reducida existen deformadas en el elemento que no producen deformación en los puntos de integración, fenómeno conocido como “hourglassing” debido a la forma de reloj de arena de los elementos bajo este efecto. Un ejemplo de esta deformada se produce cuando se aplica flexión pura sobre el elemento, situación que se presenta en la figura 1.9.

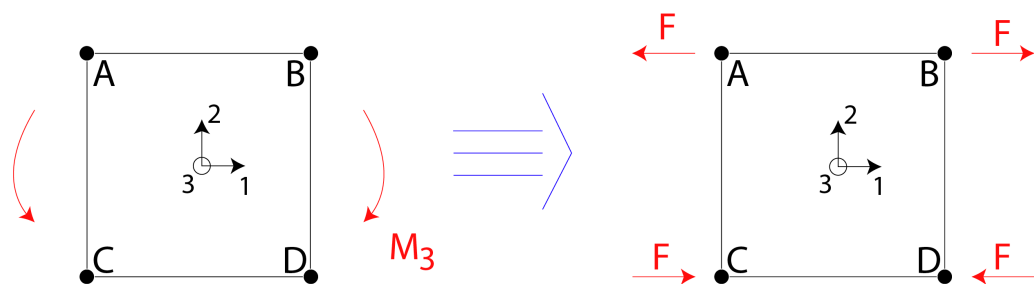


Figura 1.9 Ejemplo de estado de flexión pura ante un momento aplicado M_3 .

En dicha figura se presenta un estado de cargas de flexión pura, en el que se aplica un momento M_3 sobre un elemento con 4 nodos (A,B,C y D). En el caso de querer modelar una placa los únicos movimientos permitidos dentro del plano son los desplazamientos u_1 y u_2 , debido a que en los problemas de flexión de placas los giros en los nodos no se definen como grados de libertad. Así, en la parte derecha de esa misma figura se representa el estado de cargas que se tendría en el elemento.

Ahora bien, diferenciando para el caso de integración reducida e integración completa, si el problema se resuelve con integración reducida se tendría la deformada de la figura 1.10, donde se ha obviado en la deformada el efecto Poisson para claridad en los resultados.

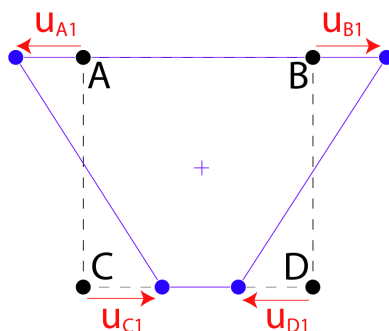


Figura 1.10 Deformación en el punto de integración de un elemento con integración reducida ante las cargas equivalentes de la flexión pura (situación indeformada en negro, y situación deformada en azul).

Como el punto de integración no se ha deformado la energía de deformación es 0, y por conservación de la energía el trabajo externo al elemento debe ser 0, luego las fuerzas son 0, es decir, hay desplazamientos y deformaciones pero sin cargas aplicadas. Este sería un ejemplo en el que se produce una deformada con hourglassing. ABAQUS posee el llamado “hourglass control”, que implementa estrategias para controlar la aparición de este fenómeno. Aún así, es necesario cercionarse de que no aparece hourglassing en el modelo, y para ello el propio usuario debe revisar los desplazamientos en las zonas propensas a dicho fenómeno.

Por otro lado, ante el mismo caso de carga descrito en la figura 1.9, si el problema se resuelve con integración completa se tendría la deformada de la figura 1.11.

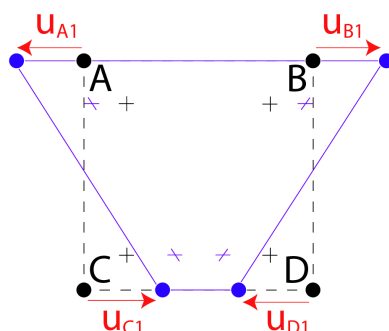


Figura 1.11 Deformación en los puntos de integración de un elemento con integración completa ante las cargas equivalentes de la flexión pura (situación indeformada en negro, situación deformada en azul).

En esta figura se observa como hay deformación tangencial en los puntos de integración (la línea vertical del punto de integración ha girado). Dado que una parte de la energía se almacena en las deformaciones tangenciales, la energía de flexión tiene que ser inferior, por lo que para las mismas cargas el elemento con integración completa se deforma menos por flexión, es decir, es más rígido. A este fenómeno se le conoce como “bloqueo por cortante”, y ABAQUS también implementa estrategias para hacerle frente, como el empleo de funciones de forma incompatibles, o “modos incompatibles”, que por defecto son las funciones de forma utilizadas siempre que se emplee integración completa.

Si bien tanto la integración reducida como la integración completa presenta fenómenos problemáticos, ABAQUS implementa estrategias para paliarlos, por lo que a nivel de usuario cualquiera de las dos opciones pueden ser utilizadas. Sólo se debe tener en cuenta que, caso de usar la integración reducida se tendrán tiempos de computación menores pero sería recomendable revisar la deformada en busca de hourglassing, problema que no existe al usar integración completa.

Una vez vista a nivel general las diferencias entre la integración completa y la integración reducida, se procede a hacer una descripción básica de los tres tipos de shell estudiados en este documento.

► Standard Shell: S4 y S4R

Los standard/conventional shell, o simplemente shell, son elementos que modelan el cuerpo discretizándolo con una superficie de referencia que representa su geometría, pero sin tener en cuenta el espesor. De esta manera, los vértices de dicha superficie son los nodos del elemento shell.

En ABAQUS los shell pueden definirse con 3 nodos (elemento S3) o con 4 nodos, siendo estos últimos los que se usarán en la memoria ya que suelen generar mallas más regulares y por tanto mejores resultados, y los S3 sólo se utilizan para ajustar la malla. A su vez, los de 4 nodos pueden ser de dos tipos, los que se resuelven con integración reducida (elemento S4R) o con integración completa (elemento S4).

En cuanto a los grados de libertad, en los shell se utilizan los desplazamientos y los giros de los nodos, y tras resolverse el problema se emplean dichos valores para calcular de manera geométrica los desplazamientos a lo largo del espesor de la shell.

En la figura 1.12 se muestra la estructura de un shell de 4 nodos.

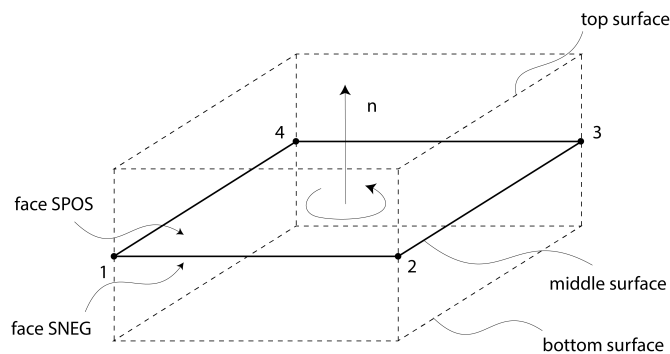


Figura 1.12 Estructura básica de un standard shell.

Se observa que la dirección de la normal del elemento se define con la regla de la mano derecha teniendo en cuenta la numeración de los nodos, y es esta dirección la que define en el elemento la cara positiva (*face SPOS*) y la cara negativa (*face SNEG*). Por otro lado, en dicha figura se representa con línea discontinua el sólido modelado con la shell, estando la superficie de referencia localizada en la *middle surface*. Es importante analizar los efectos de la posición de esta superficie.

En efecto, siguiendo con la figura 1.12, al aplicar una tie constraint entre dos shell colocadas una encima de otra es fundamental que la shell del inferior tenga la superficie de referencia en la *top surface*, y la shell de arriba la tenga en la *bottom surface*. De esta manera, los nodos de ambas shell estarían localizados en la misma superficie, y es una manera más cómoda de trabajar al disponer los resultados en el top y en el bottom de manera predeterminada.

► Continuum Shell: SC8R

A diferencia de los shell, los continuum shell discretizan el cuerpo mediante un elemento tridimensional, con una estructura como la de la figura 1.13, en vez de a través de una superficie de referencia.

Existen dos tipos de continuum shell, los “Quadrilateral Continuum Shell element” (SC8R), y la versión degradada del mismo, los “Triangular in-plane Continuum Shell element” (SC6R), donde en ambos casos SC denota *Continuum Shell*, y R denota *Reduced*, ya que ambos tipos de elementos se resuelven utilizando integración reducida con control de hourglassing.

Desde el punto de vista del modelado, los continuum shell son similares en apariencia a los sólidos 3D, solo que utilizan la ley cinemática y las ecuaciones de comportamiento del modelo de láminas de Resistencia de Materiales. Por tanto, se calculan los esfuerzos con las ecuaciones de dicho modelo, y a partir de ellos se calculan las tensiones.

Además, los elementos SC8R incluyen cambios en las magnitudes y el efecto de la deformación transversal ϵ_{12} a lo largo del espesor. Los grados de libertad de este elemento son los desplazamientos de los nodos.

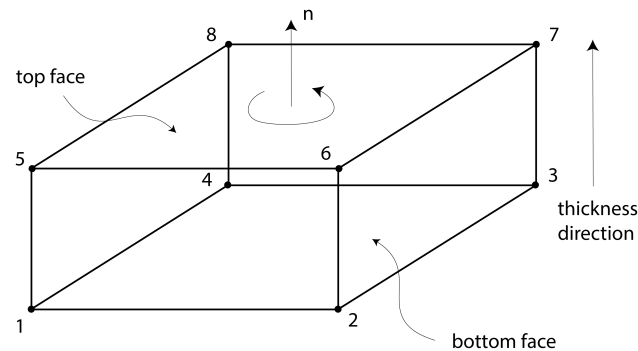


Figura 1.13 Estructura básica de un continuum shell con 8 nodos, y de un continuum solid shell.

► Continuum Solid Shell: CSS8

Los continuum solid shell son una evolución de los sólidos, a diferencia del continuum shell que es una evolución del elemento shell. Así pues, utiliza las ecuaciones de comportamiento de un sólido pero incorpora las funciones de forma de las shell. Además, a diferencia de las continuum shell, los continuum solid shell siempre utilizan integración completa.

Por otro lado, los continuum solid shell tienen la misma estructura que los continuum shell (figura 1.13), y sus grados de libertad también son exclusivamente los desplazamientos de los nodos.

1.4 Objetivo

El objetivo de este trabajo es analizar y comparar los elementos shell, continuum shell y continuum solid shell implementados en el software ABAQUS, modelando una panel rigidizado *monostinger* con runout, construido en su totalidad con material compuesto.

Así, se presentan diversas estrategias, ventajas, inconvenientes y posibilidades de cada elemento, corroborándose a su vez los resultados obtenidos de manera numérica con los obtenidos en laboratorio en un ensayo de tracción realizado sobre la probeta modelada.

1.5 Metodología

Para alcanzar el objetivo de esta memoria se emplea la versión 2019 de ABAQUS.

Por otro lado, en todo el documento se trabaja con la fuerza en kilonewton (KN) y la longitud en milímetros (mm), por lo que las unidades del módulo de elasticidad y las tensiones se introducen y se obtienen en GPa, respectivamente.

En cuanto a la probeta modelada, como ya se ha mencionado se trata de una panel rigidizado *monostinger* con runout. Está compuesta por una piel, que en este documento se llama “skin”, y un rigidizador en forma de T, siendo el ala llamada “foot stringer” y el alma llamada “web stringer”. En la figura 1.14 se presenta

la probeta de manera esquemática, donde se aprecia en azul la skin, en verde el foot stringer y en un tono grisáceo el web stringer. Además, también se observan algunas bandas extensométricas que se utilizaron en el ensayo experimental, siendo las de la skin presentadas en naranja, las del foot stringer en morado y las del web stringer en rojo.

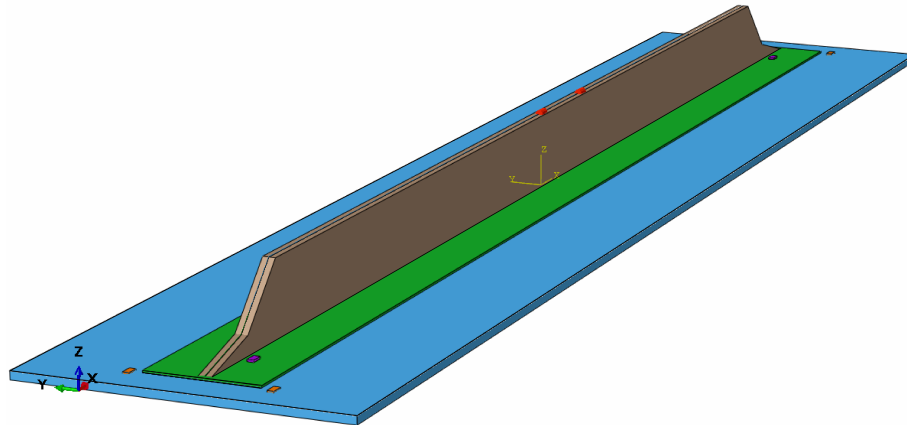


Figura 1.14 Vista en perspectiva de la probeta modelada en ABAQUS.

Tras conocer de manera cualitativa la geometría de la probeta, se está en disposición de describir el ensayo experimental que se realizó sobre la misma. El ensayo de tracción fue efectuado por el GERM, grupo que dispone de una experiencia consolidada en el análisis de runouts tanto desde el punto de vista experimental como numérico, y se realizó con las mordazas situadas en los extremos de menor longitud de la piel, sin entrar en contacto con el foot stringer. Así, se fue aplicando y aumentando cuasiestáticamente la carga, registrando las deformaciones en 16 bandas extensométricas y la curva carga desplazamiento, hasta llegar al fallo de la probeta, alcanzado con una carga total $F=330$ KN.

Continuando la descripción de la probeta de manera cuantitativa, en las figuras 1.15 y 1.16 se presentan la vista en planta y de perfil de la probeta. En dichas figuras se aprecia la posición de las 16 bandas extensométricas, siendo 8 colocadas en la parte superior de la probeta (en la skin, en el foot stringer y en el web stringer), que son las bandas de número impar, y las otras 8 fueron colocadas en la parte inferior, es decir, en la skin, siendo estas las de número par y denotadas en la figura 1.15 con una flecha que rodea al número de la banda. Mencionar que, si bien la geometría de la probeta que se define en el modelo de ABAQUS es simétrica, la ensayada no lo es por los defectos derivados de la fabricación, pero al ser prácticamente simétrica se supone como tal en el modelo.

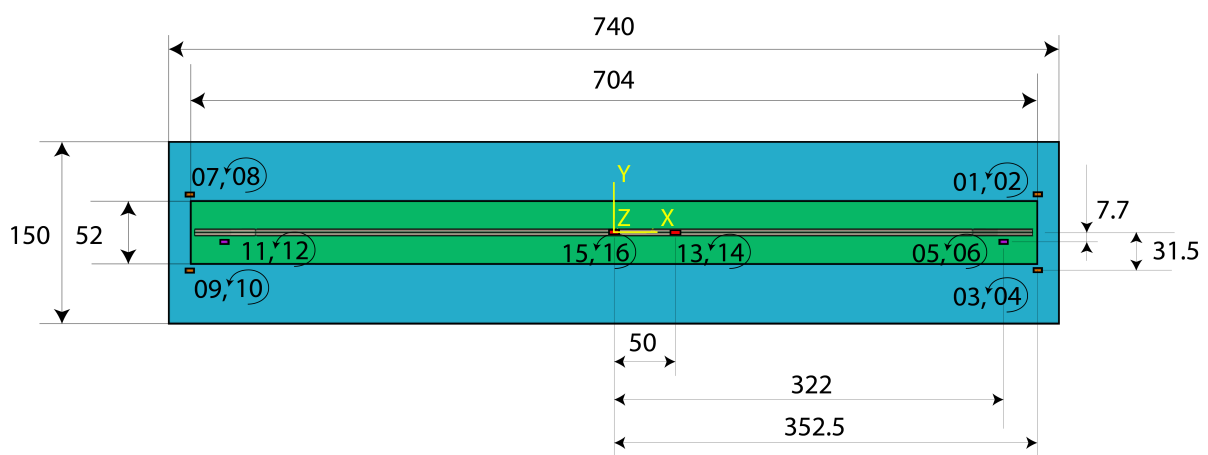


Figura 1.15 Vista en planta con dimensiones de la probeta.

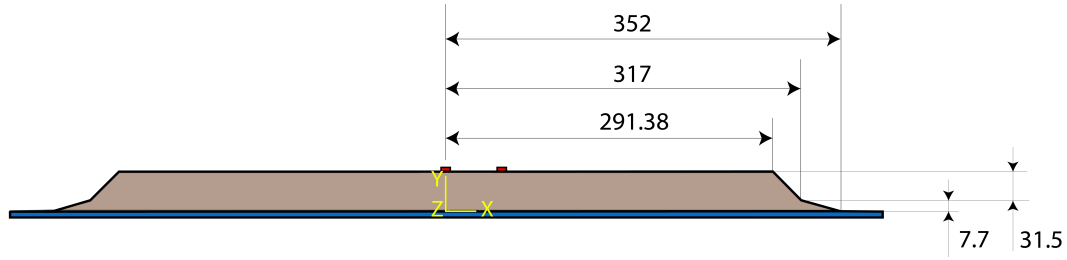


Figura 1.16 Vista de perfil con dimensiones de la probeta.

Además, viendo la geometría de las 3 partes que componen la probeta se observa que todas ellas cumplen que el espesor es mucho menor que las otras dos dimensiones, pudiéndose considerar que se trata de un problema de láminas y por tanto los elementos tipo shell son adecuados para modelar las distintas partes de la probeta.

Entrando en las propiedades mecánicas de la probeta, todas sus partes son de material compuesto “IMA/M21EV”, cuyas propiedades de rigidez nominales son las mostradas en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Propiedades de rigidez.

E_{11}	E_{22}	ν_{12}	G_{12}
150 GPa	8 GPa	0.35	4 GPa

Al no disponerse de los valores del resto de propiedades de rigidez que definen un material ortótropo, se asumen las siguientes hipótesis para concretarlos:

- $E_3 = E_2$, ya que teniendo en cuenta como se definen los ejes 1, 2 y 3 para un material ortótropo, E_2 y E_3 son las rigideces en la dirección perpendicular a la fibra, por lo que es razonable suponer que son equivalentes.
- De manera similar se puede hacer el mismo razonamiento anterior para concluir que $G_{13} = G_{12}$ y para $\nu_{13} = \nu_{12}$.
- Para ν_{23} el tutor del trabajo ha elegido un valor razonable, y para obtener G_{23} simplemente se aplica la definición dada en la ecuación 1.1 (laminado cuasi-isótropo).

$$G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{23})} \quad (1.1)$$

Por tanto, se obtienen las propiedades de rigidez restantes, que se muestran en la tabla 1.2

Tabla 1.2 Propiedades de rigidez obtenidos por hipótesis.

E_3	G_{13}	G_{23}	ν_{13}	ν_{23}
8 GPa	4 GPa	3 GPa	0.35	0.33

En cuanto al laminado de la skin, del foot stringer y del web stringer se tiene las secuencias presentadas en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Secuencias de apilado para las distintas partes del modelo.

		Secuencia	Nº Láminas	Espesor total
Skin		[45/0/-45/0/0/90/-45/0/45/0/0/45/0/-45/90/0/0/-45/0/45]	20	3.84 mm
Foot Stringer	Left	[45/-45/90/-45/45]	5	0.96 mm
	Right	[-45/45/90/45/-45]	5	0.96 mm
Web Stringer		[-45/45/90/45/-45/0/0/0/-45/0/0/0/45/0/0]s	30	5.76 mm

Es importante remarcar la distinción hecha entre la parte izquierda y derecha del laminado del foot stringer. Para comprenderla, hay que hacer referencia al proceso de fabricación de la probeta, donde se van uniendo entre sí las láminas pertenecientes al núcleo del web stringer (en este caso compuesto por 20 láminas) y después se apila sobre el núcleo del web stringer las láminas del foot stringer, curvándose dichas láminas como se observa en la figura 1.17. En la figura 1.18 se puede observar como quedan las láminas que forman el foot stringer si se decide que el laminado del web stringer sea simétrico, obteniéndose distintos laminados en la parte izquierda y derecha del foot stringer debido al sentido en el que se dobla el laminado en una dirección u otra, de ahí la secuencia y el número de láminas que se implementa en ABAQUS para cada parte del modelo.

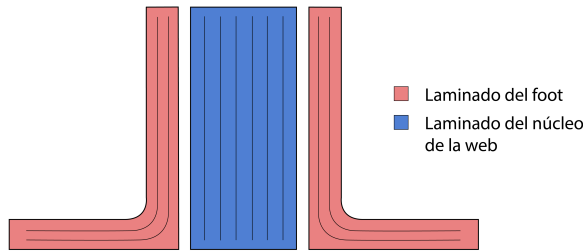


Figura 1.17 Esquema de la sección de un stiffener real.

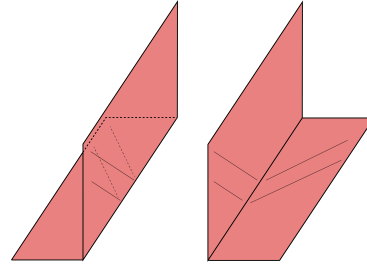


Figura 1.18 Esquema de una lámina con la misma orientación de las fibras en la parte derecha y en la izquierda de la web.

En cuanto a las bandas, en el modelo son nombradas como JS**, y dado que en la realidad no dan mayor rigidez a la zona de aplicación, se le asigna un material isótropo hipotético llamado “GAGE” con las propiedades de la tabla 1.4, siendo la rigidez muy inferior a la E_1 del material compuesto.

Tabla 1.4 Propiedades de rigidez de las bandas del modelo.

E	ν
0.1 GPa	0

1.6 Contenido

Se presenta el contenido del documento en estas líneas.

En el capítulo 1 se describe el marco en el que se desarrolla el TFG dentro del sector aeroespacial, se exponen los objetivos académicos y técnicos planteados, y la metodología utilizada para alcanzarlos.

En el capítulo 2 se describen los modelos y los resultados obtenidos empleando los elementos standard shell, siguiendo los capítulos 3 y 4 esta misma estructura solo que aplicada a los continuum shell y a los continuum solid shell, respectivamente.

Por último, en el capítulo 5 se realiza un resumen de los objetivos alcanzados, se desarrollan conclusiones sobre el estudio realizado y se proponen posibles desarrollos futuros relacionados con el mismo.

2 MODELOS CON STANDARD SHELL

En este capítulo se presenta la estrategia seguida para modelar la probeta con los elementos standard shell en ABAQUS (apartado 2.1), se desarrolla la convergencia del mallado para determinar el tamaño de los elementos que se extrapolará a todos los modelos (apartado 2.2) y se presentan los resultados de los modelos con elementos standard shell (apartado 2.3).

Es muy importante tener en cuenta que en lo que sigue se diferencian entre 3 sistemas coordenados:

1. Sistema de referencia *Global*, referido a los ejes X, Y, Z : Son los ejes globales de ABAQUS. Este sistema siempre se representa en la esquina inferior izquierda en el módulo *Visualization* sea cual sea el sistema elegido para la representación de los resultados (ver figura 2.1).
2. Sistema de referencia *ASSEMBLY__T-Datum csys-1*, referido a los ejes x, y, z : Sistema de referencia con los ejes en la misma dirección que el global.

Es importante destacar que en el caso de presentar la componente de una magnitud vectorial, como los desplazamientos, el sistema *ASSEMBLY__T-Datum csys-1* es totalmente equivalente al global. Sin embargo, en el caso de presentar alguna componente de un tensor, el sistema se proyecta de tal forma que el eje x coincide con el eje X del sistema global, el eje z va en la misma dirección y sentido que la dirección de apilado de los elementos de la part, y el eje y completa el triedro a derechas.

En la figura 2.1 se presenta este sistema de referencia proyectado en cada parte del modelo. En dicha figura se muestra que los ejes x, y, z coinciden para la skin y para todo el foot stringer, pero difieren para el caso del web stringer.

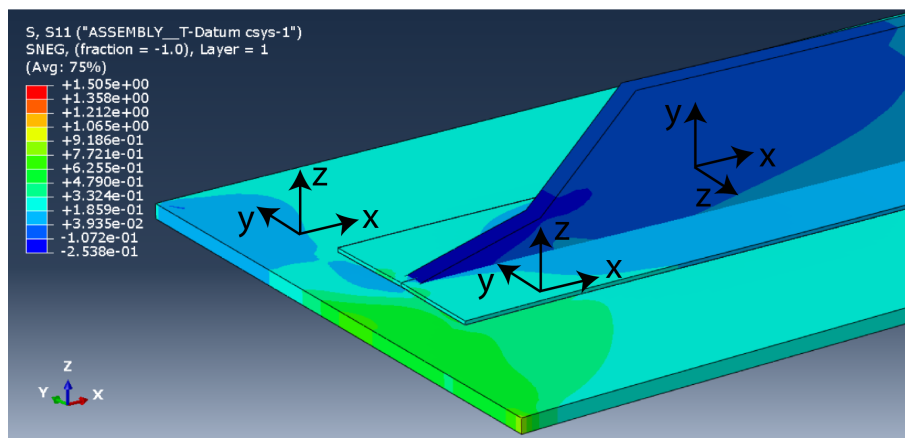


Figura 2.1 Ejemplo de representación en el sistema *ASSEMBLY__T-Datum csys-1* donde se observa la dirección de los ejes x, y, z en las 3 partes fundamentales del modelo: skin, foot stringer y web stringer.

3. Sistema de referencia *Default*, referido a los ejes 1,2,3: Este sistema se emplea en el documento para representar en cada lámina las tensiones en la dirección de la fibra y en sus direcciones transversales. En concreto, el eje 1 coincidente a la dirección de la fibra, el eje 3 va en en la misma dirección y sentido que la dirección de apilado de los elementos de la part, y el eje 2 completa el triedro a derechas.

En la figura 2.2 se representa el sistema de coordenadas *Default* con respecto al *ASSEMBLY__T-Datum csys-1* en las distintas partes del modelo menos en la parte izquierda del foot stringer para no sobrecargar la figura. Se ha marcado en morado aquellos ejes del sistema *Default* que difieren de los ejes del sistema *ASSEMBLY__T-Datum csys-1* proyectado.

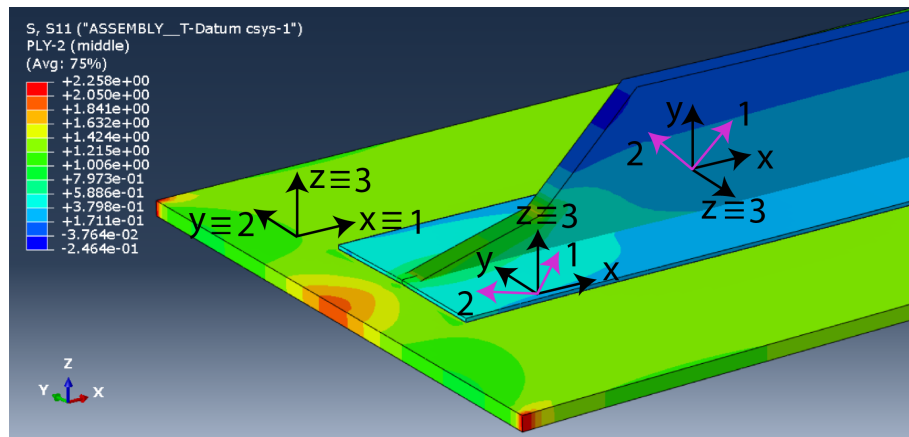


Figura 2.2 Ejemplo de representación en el sistema *Default* donde se observa para la lámina 2 (ver tabla 1.3) la dirección de los ejes 1,2,3 en la skin (fibras a 0°), en la parte derecha del foot stringer (fibras a $+45^\circ$) y en el web stringer (fibras a $+45^\circ$).

En la figura se observa cómo se tiene una dirección de los ejes 1,2,3 en función de la parte del modelo donde se represente y de la dirección de la fibra en la lámina representada.

2.1 Descripción de los modelos

A continuación se describe el proceso seguido para modelar en ABAQUS la probeta descrita en la sección 1.5 utilizando elementos shell convencionales.

En primer lugar, en el módulo *Part* se definen 6 *parts* distintas, 2 *parts* para cada una de las 3 zonas del modelo. Así, se define la part “skin” asociada a la piel, y la part “gage-skin” asociada a las bandas extensométricas que se adhieren a la skin. Se razona de la misma manera para definir el “foot-stringer” y el “gage-foot-stringer”, y el “web-stringer” y su “gage-web-stringer” asociado. Todas ellas son creadas con *Shape* de tipo *Shell*.

A continuación, en el módulo *Mesh* se le asigna un elemento tipo *Truss* lineal a la *part* de la banda en el web stringer, y se diferencia entre dos modelos dentro de los elementos standard shell lineales elegidos:

1. **Modelo S4**, en el que a la skin, al foot stringer, al web stringer y a las bandas de la skin y del foot se le asignan elementos S4, elementos standard shell con integración completa.
2. **Modelo S4R**, en el que a la skin, al foot stringer, al web stringer y a las bandas de la skin y del foot se le asignan elementos S4R, elementos standard shell con integración reducida.

Además, en este módulo también se realizan particiones sobre la skin para poder definir en la zona de unión con el foot stringer un mallado cuya posición de los nodos sea igual a la del foot stringer. En cuanto a la elección del tamaño de los elementos en la skin, en el foot stringer y en el web stringer, se ha realizado una convergencia de la malla en el apartado 2.2 en el que se concluye que el tamaño del elemento máximo será de 6 mm y el tamaño mínimo de 1.8 mm.

En el módulo *Property* se definen los dos materiales empleados en el modelo, el “IMA/M21EV” para la probeta y el “GAGE” para las bandas. Además, se asignan las correspondientes secciones a las bandas y se definen los *composite layups* para cada zona del modelo, habiendo hecho una partición en el foot stringer para diferenciar entre el laminado de la parte izquierda y el de la parte derecha. Cabe destacar que, teniendo en cuenta la figura 1.12, la superficie de referencia en la skin y en las bandas de la skin está en el top, la del foot stringer y la de sus bandas está en el bottom y la del web stringer se deja en el middle, siendo el bottom de la skin y del foot stringer la que se tiene menor valor en la coordenada Z y el bottom del web stringer es la parte de la misma donde se tiene mayor valor en la coordenada Y (ver figura 1.14).

En el módulo *Assembly* se crean las *instances* asociadas a la skin, al foot stringer y al web stringer, y se crea una *instance* para cada banda extensométrica del modelo, a excepción de las *instances* JS01, JS03, JS07 y JS09, que se colocan en el top de la skin, y debido a que la superficie de referencia de las bandas de la skin está en el top y su espesor coincide con el espesor de la skin se pueden obtener conjuntamente los resultados de esas bandas y las de las bandas JS02, JS04, JS08 y JS10 sin más que elegir de forma adecuada los SP en los que quieres los resultados (SP5 para el primer conjunto de bandas, SP1 para el segundo conjunto). Tras crear las *instances*, se colocan unas con respecto a otras usando translaciones y *Face to Face constraints*.

En el módulo *Step* se define un paso de tipo *Static, General* en el que se tienen en cuenta las no linealidades geométricas, y se define un *Time Period* 500 con un incremento máximo de 25, haciendo referencia a los 500 KN de carga que se aplicarán sobre la probeta de manera cuasiestática, con el fin de superar la carga máxima de 330 KN registrada durante el ensayo de tracción.

En el módulo *Interaction* se define el pegado de unas superficies con otras mediante las *tie constraints*. Así, se une el foot stringer con la skin siendo la superficie inferior del foot la superficie maestra, y la zona de la skin adherida con el foot la superficie esclava, y se une el web stringer con el foot stringer siendo la línea central del foot stringer la superficie maestra y la línea inferior del web stringer la superficie esclava. Para las uniones con las bandas, la superficie de la cara positiva de la banda de la skin se une con la superficie de la cara negativa de la skin, y la superficie de la cara negativa de la banda del foot stringer se une con la superficie de la cara positiva del foot stringer, siendo en todas estas uniones la superficie de la banda la esclava en las *tie constraints* definidas en cada parte del modelo donde hay bandas extensométricas. Por otro lado, se utilizan 2 *MPC constraints*, uno para cada extremo de la probeta.

En la figura 2.3 se visualiza la probeta en el módulo *Interaction* para el modelo con elementos shell. Resaltar que el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer son las caras ocultas de la vista presentada.

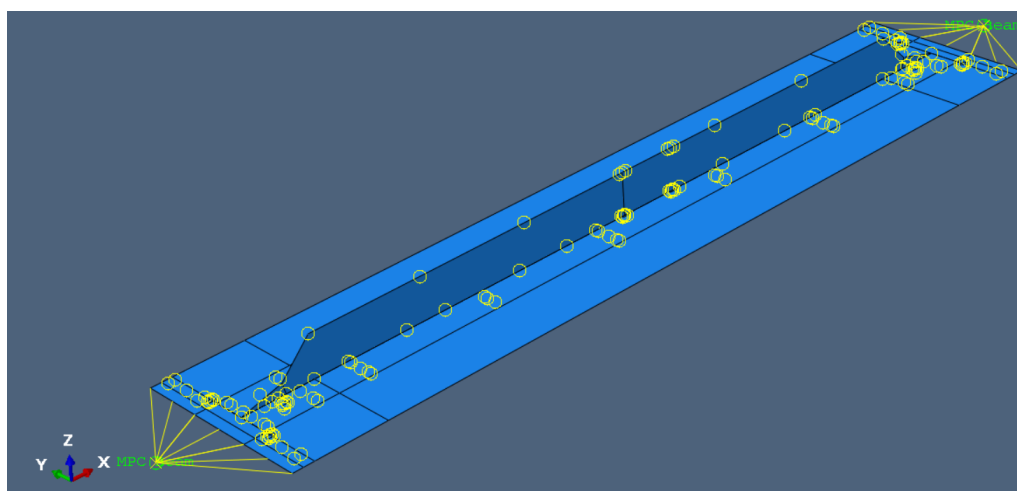


Figura 2.3 Vista en el módulo *Interaction* del modelo con elementos shell.

Por último, antes de crear el archivo .inp en el módulo *Job* y resolver el problema, en el módulo *Load* se definen las condiciones de contorno y las cargas que se aplican en el modelo. En concreto, teniendo en mente la figura 1.14, en el punto de control del *MPC constraint* del extremo con $X > 0$ se define un empotramiento,

y en el punto de control del *MPC constraints* del otro extremo se impiden todos los desplazamientos y los giros, salvo el desplazamiento en la dirección X , y se aplica una fuerza concentrada $F_X = -500KN$, siendo los ejes los globales del modelo.

2.2 Convergencia del mallado

Analizar la convergencia de la malla es un aspecto fundamental a la hora de resolver y validar un modelo de elementos finitos. Este proceso no es más que asegurar que al aumentar el número de elementos de la malla, la variación de los resultados es despreciable. Así pues, caso de que los resultados no sean los esperados, se puede asegurar que la malla no contribuye al error obtenido, y además, se resuelve el modelo con el mallado más pequeño posible que genera resultados correctos, reduciendo el tiempo de computación.

Para hacer dicha convergencia se opta por modelar la probeta con elementos S4 estando sometida a la tracción descrita en el capítulo 1, y se emplea el análisis de perturbaciones lineales incluido en el software. El análisis elegido permite descartar efectos no lineales y por tanto reduce el tiempo de computación a la hora de resolver un problema. Una vez definido y resuelto el modelo, se pueden comparar los resultados de un mallado y otro analizando el campo tensional en ciertas zonas de interés, que suelen ser aquellas con un gradiente tensional pronunciado. Dada la disposición de las bandas extensométricas sobre la probeta, se utiliza dichas bandas para obtener los resultados de las deformaciones, ya que estas últimas son equivalentes a las tensiones sin más que aplicar la ley de comportamiento del material. De esta manera, se presentan las deformaciones ϵ_{xx} en las bandas, que son las deformaciones en la dirección de la carga.

Así pues, en el módulo *Step* se realiza un *Linear Perturbation* de tipo *Static*. En cuanto al proceso de definición y refinado de la malla, se utilizan dos tipos de mallado:

1. Malla de n elementos con un mismo tamaño de elemento en cada parte del modelo, denotado en las gráficas como “xxxx-U”, siendo $n=xxxx$, y la U denota un mallado uniforme sobre la probeta.
2. Malla de n elementos con un mallado más selectivo, reduciendo el tamaño de los elementos en las zonas críticas, esto es, las zonas de runout, y aumentando de manera progresiva con un *bias control* el tamaño del elemento en las partes con menor variación del campo tensional, como es la parte central de la skin o del foot stringer, es decir, entre $X=0$ y $X=291.38$ mm, y en el ancho de la skin, concretamente entre $Y=26$ mm e $Y=75$ mm. Esta malla se denota en las gráficas como “xxxx”.

Por tanto, en cada iteración se reduce de manera progresiva y escalada el tamaño del elemento en las 3 partes del modelo (skin, foot stringer y web stringer).

A continuación se representan y se comentan los resultados de la convergencia de la malla para las bandas JS01, JS02, JS11, JS12, JS15 (véase figura 1.15 para situar dichas bandas en la probeta). A pesar de que existen 16 bandas extensométricas, se ha optado por estas 5 para facilitar la lectura del documento, ya que los resultados de las deformaciones a la derecha y a la izquierda de la probeta son simétricas, y además, hay ciertas bandas como la JS01 y JS02 que tienen la misma convergencia que JS03 y JS04 respectivamente. También se ha optado por no presentar las bandas JS14 y JS16, ya que se alcanza una convergencia muy rápida debido a que se encuentran en una zona del modelo que no es crítica.

Así pues, en las figuras 2.4 y 2.5 se presentan respectivamente las deformaciones ϵ_{xx} en la banda JS01 y JS02 frente al número de elementos de la malla. Se observa que en la zona superior de la skin, en la zona próxima al runout, se tienen grandes variaciones en las deformaciones para las primeras mallas analizadas, y se aprecia el efecto de concentrar los elementos de menor tamaño en la zonas del modelo con mayor variación en las deformaciones. Las deformaciones en JS01 y JS02 convergen para 20500 elementos.

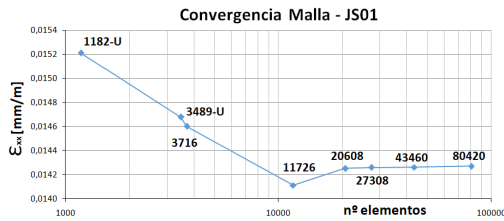


Figura 2.4 Convergencia de la malla de la banda JS01.

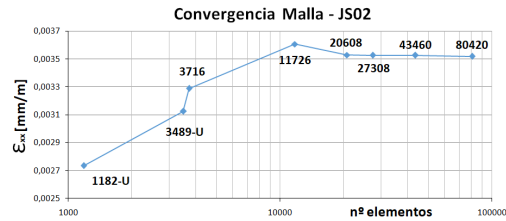


Figura 2.5 Convergencia de la malla de la banda JS02.

En las figuras 2.6 y 2.7 se presentan las deformaciones ϵ_{xx} en las bandas JS11 y JS12, y se observan unos resultados similares a los obtenidos para JS01 y JS02. Es interesante resaltar la variación obtenida en JS11 al pasar de 3489-U a 3716 elementos, que es razonable ya que la malla se refina en concreto en la zona del foot stringer donde se colocan las bandas JS11 y JS12.

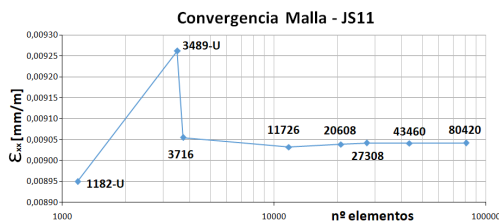


Figura 2.6 Convergencia de la malla de la banda JS11.

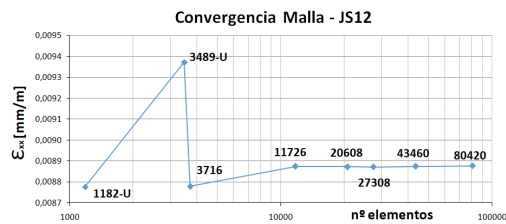


Figura 2.7 Convergencia de la malla de la banda JS12.

Por último, en la figura 2.8 se presentan las deformaciones para la banda JS15, situada en la parte central del borde superior del web stringer.

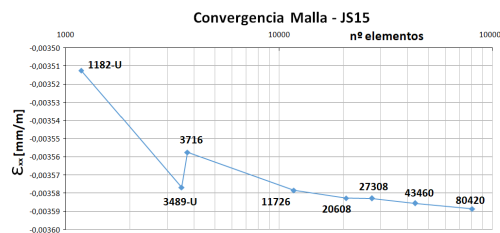


Figura 2.8 Convergencia de la malla de la banda JS15.

Como conclusión a estas figuras, se tiene que a partir de 20608 elementos puede considerarse que los resultados convergen, y en el peor de los casos se tendría una variación de 0.26% en las ϵ_{xx} frente a la malla de 80420 elementos. Se opta por la malla de 27308 elementos, ya que es en la que se tendrán resultados más estables debido a que existe poca diferencia con el mallado anterior y posterior. La malla elegida tiene un tamaño mínimo de 1.8 mm, llegando a tener hasta 6 mm en la zona central del foot stringer y de la skin, que es donde se tienen los elementos de mayor tamaño en todo el modelo. Representando ahora para cada malla los tiempos de computación para la resolución de la perturbación lineal se obtiene la figura 2.9.

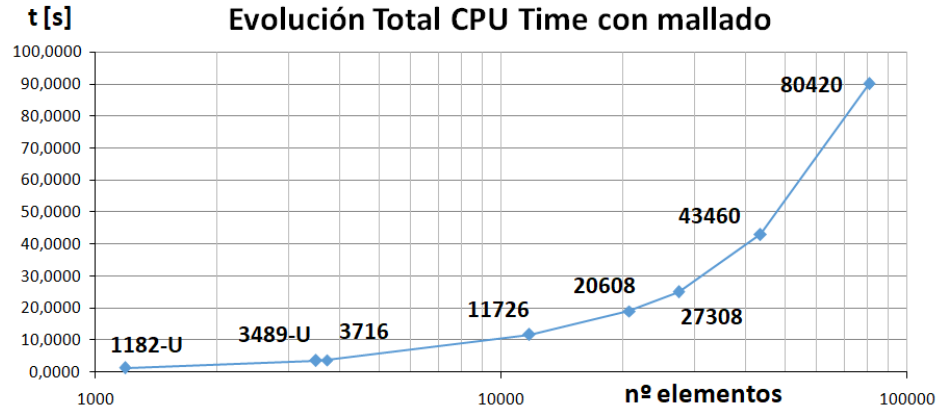


Figura 2.9 Evolución del tiempo de computación en función del número de elementos de la malla.

En esta figura se observa que el tiempo de computación para la malla de 80420 es el 360% del tiempo de la malla de 27308, obteniéndose una variación máxima de las deformaciones en las bandas de 0.16%. Esta reducción del tiempo de computación es fundamental en un modelo no lineal, ya que el sistema de ecuaciones $\mathbf{F} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{u}$ se deberá resolver muchas veces, al menos una por cada step.

En resumen, tras quedar de manifiesto la importancia de realizar este estudio en cuanto a rapidez en la obtención de resultados, se decide utilizar una malla de 27308 elementos para el caso de la shell, que se asocia a un tamaño de elemento de 1.8 mm en la zona refinada y a un tamaño máximo de 6 mm. Todos los modelos realizados tendrán estos tamaños de elemento y la misma distribución de los mismos en las distintas partes del modelo, solo que en función de la naturaleza del elemento se tendrán distintos número de nodos y de elementos.

Nota: La convergencia del mallado se ha hecho con un laminado de [45/-45/90/-45/45/0/0/0/-45/0/0/0/45/0/0]s para el web stringer. Sin embargo, esta diferencia no afecta a la convergencia de la malla, por lo que el resultado que se presenta es válido.

2.3 Resultados

Tras la descripción de la elaboración de los modelos S4 y S4R y dejar constancia del proceso de convergencia de malla realizado, se procede a presentar los resultados obtenidos en el análisis no lineal para ambos modelos.

En el apartado 2.3.1 se presenta la deformada, el campo de desplazamientos y la curva carga desplazamiento, en el apartado 2.3.2 se presentan los campos de deformaciones en las láminas top y bottom de la probeta, así como las deformaciones en las bandas, y en el apartado 2.3.3 se muestran las tensiones máximas en el modelo así como los campos tensionales de algunas láminas donde se dan dichas tensiones.

2.3.1 Desplazamientos

En las figuras 2.10 y 2.11 se presenta respectivamente el campo de desplazamientos u_x y u_z de los modelos S4 y S4R en el sistema de referencia *ASSEMBLY__T-Datum csys-1*, estando la deformada con un factor de escala de 10 para visualizar con claridad el resultado de la aplicación de la carga sobre la probeta.

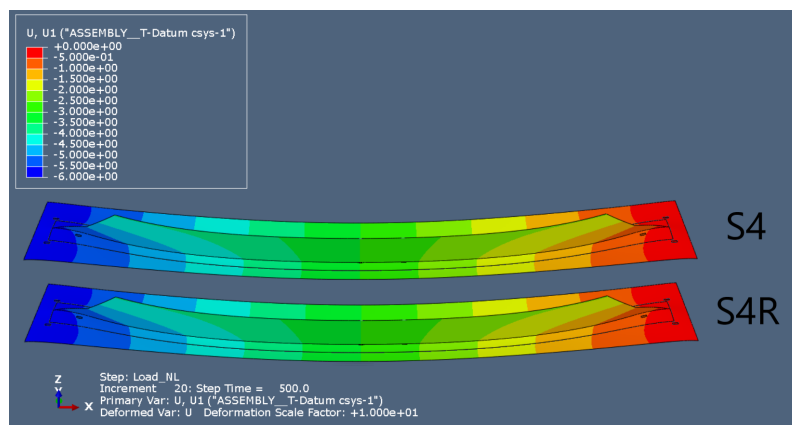


Figura 2.10 Desplazamientos u_x y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y elementos S4R.

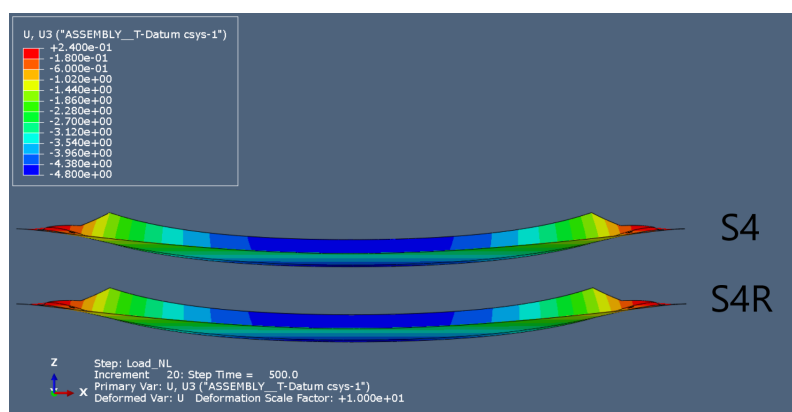


Figura 2.11 Desplazamientos u_z y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y elementos S4R.

De las dos figuras mencionadas con anterioridad se concluye que los campos de desplazamientos de ambos modelos son prácticamente iguales. Además, destacar que no se observa hourglassing en el web stringer, que es el único sitio del modelo propenso a que ocurra dicho fenómeno debido a que se produce flexión en el plano del elemento.

Además, de dichas figuras es interesante destacar que a pesar de que la carga es en la dirección x se produce una flexión en la probeta. En efecto, la carga se aplica sobre la lámina gracias a las MPC constraint de los extremos, por lo que estudiando la figura 2.12 se puede observar que la fuerza aplicada F_x produce un momento sobre la línea de centro de gravedad de la zona central de la probeta. Esto provoca un flector M_y sobre la misma, que produce en los primeros pasos de carga tracciones en la parte inferior y compresiones en la parte superior, al menos en la parte central de la probeta. En cuanto a los extremos, el hecho de que los ambos tengan todos los desplazamientos y los giros impedidos, salvo el desplazamiento u_x en el extremo donde se aplica la carga, produce un momento de flexión que origina una flexión inicial de la placa hacia arriba en los dos extremos, que provocará tracciones en la parte superior de la probeta y compresiones en la parte inferior.

Así pues, a pesar de que se esperaría que la carga aplicada produzca tracción sobre el conjunto de la probeta desde el inicio del ensayo, esto no es así. Sin embargo, conforme va aumentando la carga en el ensayo esta situación cambia, ya que a pesar de que en los instantes iniciales la flexión domina al axil, como la probeta está curvada la distancia entre la línea de centros de gravedad y la línea de aplicación de las cargas disminuye. Por tanto, la distancia d será pequeña, y los incrementos de carga aumentan el axil, y caso de que el flector aumente en la zona del centro de gravedad lo hace en menor proporción que el axil ($M = F \cdot d$, F crece, pero d disminuye). Se concluye que si la carga es suficientemente grande, la tracción dominará en todo la probeta.

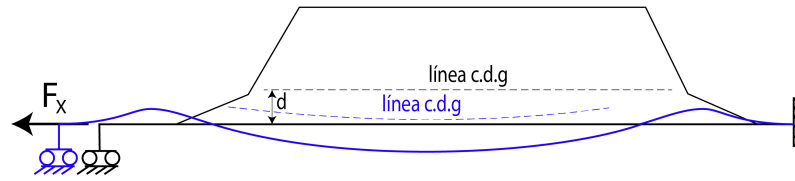


Figura 2.12 Vista de perfil de la probeta (vista en plano xz), donde se observa en negro la configuración indeformada de la probeta y su línea de centro de gravedad a una distancia d de la piel, y en azul la skin y la posición de la línea de centro de gravedad en una situación deformada genérica del ensayo.

La evolución de la deformación descrita se puede corroborar observando las ϵ_{xx} asociadas a la banda JS15 y JS16 (figura 2.22).

Por otro lado, en la figura 2.13 se observa la evolución de los desplazamientos en el extremo de la probeta frente a la carga aplicada.

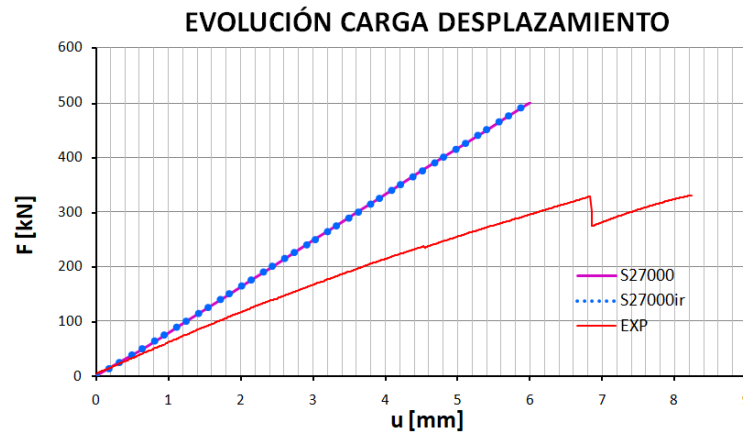


Figura 2.13 Curva carga desplazamiento de los modelos shell frente a los resultados experimentales.

De la curva carga desplazamiento se observa una mayor rigidez del modelo numérico con respecto al real. Esto no tiene por qué restar confianza sobre los modelos elaborados, ya que esta diferencia podría deberse a muchos factores que afectan a las medidas experimentales, como puede ser la rigidez de la máquina de ensayo, y sobre todo como se fija la probeta a las mordazas y la rigidez de las mismas. Otro aspecto que también podría contribuir a esta diferencia son los pequeños deslizamientos producidos entre las mordazas y la probeta durante el ensayo, ya que en laboratorio nunca se pueden llevar a cabo a la perfección las condiciones de contorno.

2.3.2 Deformaciones

A continuación se presentan las deformaciones sobre las láminas en el top y en el bottom de la probeta para tener una perspectiva global de los resultados del problema, ya que las deformaciones evolucionan linealmente a lo largo del espesor. Se ha renderizado el espesor de la shell a escala 1:1 con el fin de clarificar los resultados cuando se muestran de manera simultánea la skin y el foot stringer.

En la figura 2.14 se muestra el campo de deformaciones ϵ_{xx} en las láminas en el top de la probeta. Se observa que los campos ϵ_{xx} presentados para los dos modelos son prácticamente equivalentes. Por otro lado, se observa como en la skin se tiene la máxima deformación en la zona de unión con el extremo del runout, y también que existe simetría en las deformaciones tanto respecto al web stringer como respecto a un plano yz situado en el centro de la probeta.

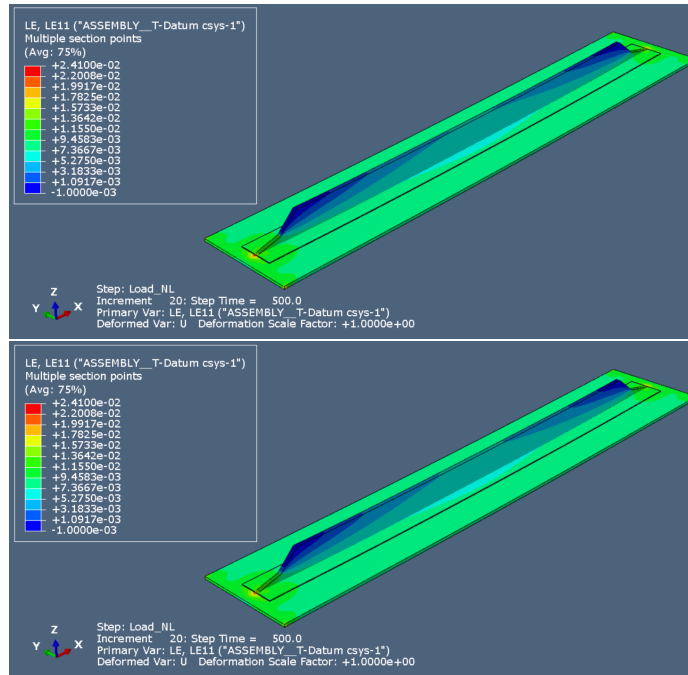


Figura 2.14 Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo).

En la figura 2.15 se muestra el campo de deformaciones ϵ_{xx} en las láminas en el bottom de la probeta. Además de ser ambos campos iguales y presentar simetría, al compararlas con la figura 2.14 se observa que las deformaciones máximas en el caso de las láminas en el top son mayores que las de las láminas en el bottom debido a que dichos máximos se dan en los extremos del runout en la zona de la skin y del foot stringer, por lo que es razonable teniendo en cuenta que la deformada de la probeta presentada en la figura 2.11 y el razonamiento asociado a la figura 2.12.

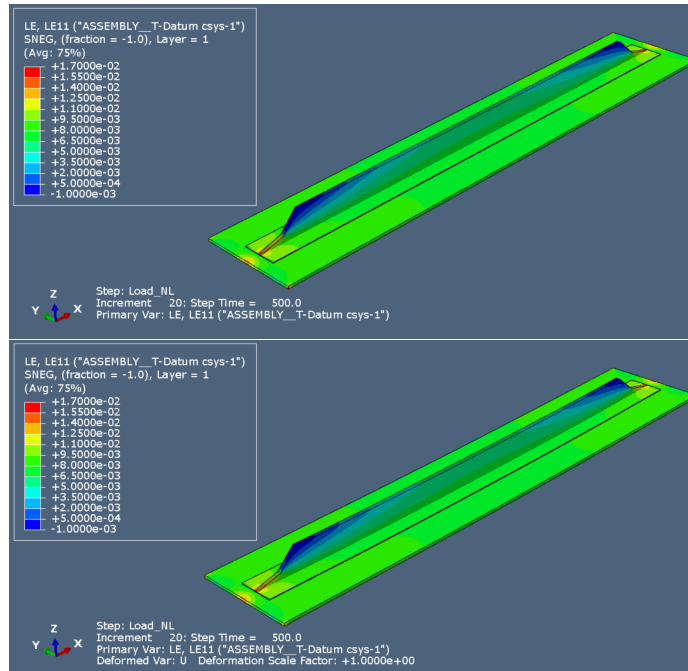


Figura 2.15 Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo).

En las figuras 2.16 y 2.17 se muestran el campo de deformaciones ϵ_{yy} en las láminas en el top y bottom de la probeta respectivamente, donde la zona gris se corresponde con una zona fuera del intervalo de valores elegidos. Se observa como las deformaciones, además de ser muy similares para ambas figuras, son $\epsilon_{yy} < 0$ debido al efecto Poisson por la tracción de la probeta en dirección x .

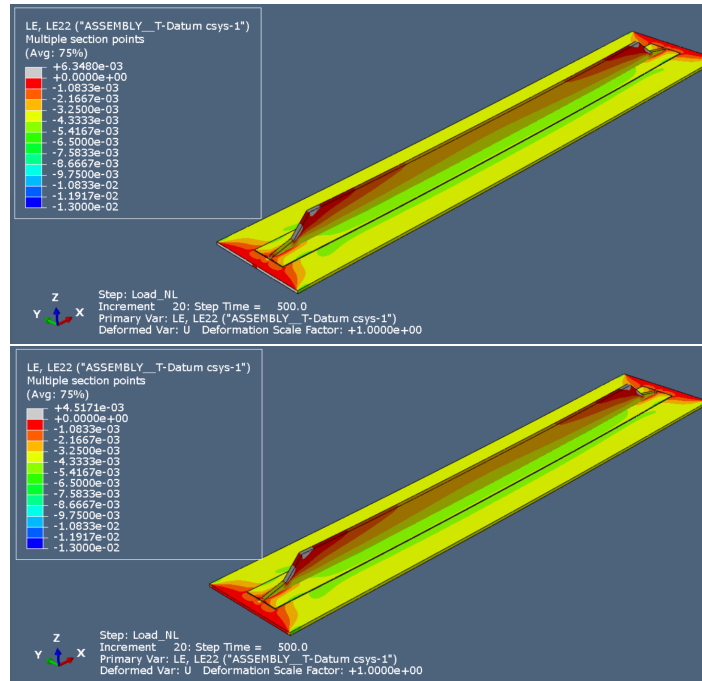


Figura 2.16 Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo).

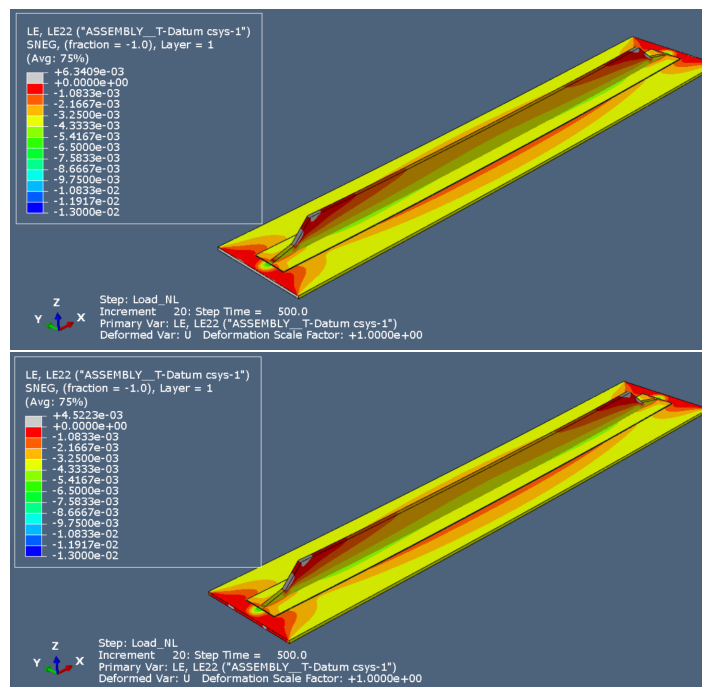


Figura 2.17 Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo).

Por último, en las figuras 2.18 y 2.19 se muestran el campo de deformaciones ϵ_{xy} en las láminas en el top y bottom de la probeta respectivamente. Se concluye que las deformaciones son muy similares. Además, presentan una antisimetría con respecto al web stringer y con respecto al centro de la probeta.

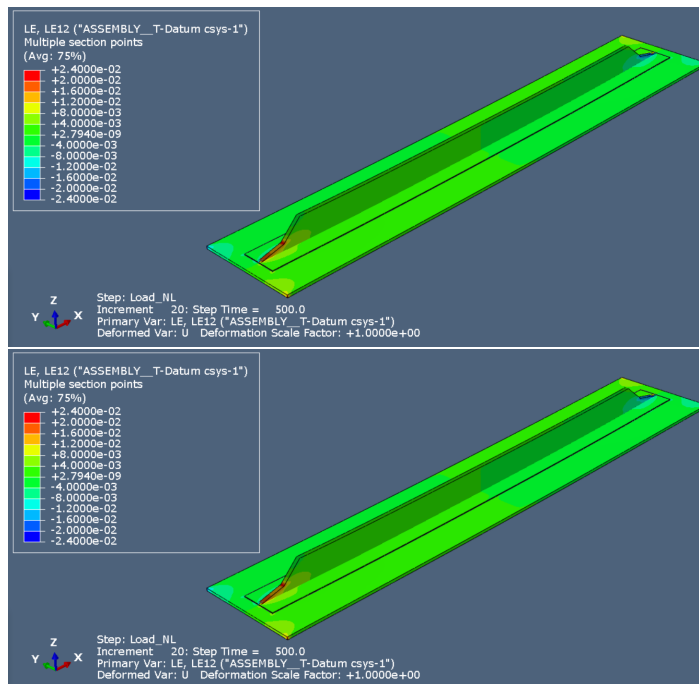


Figura 2.18 Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo).

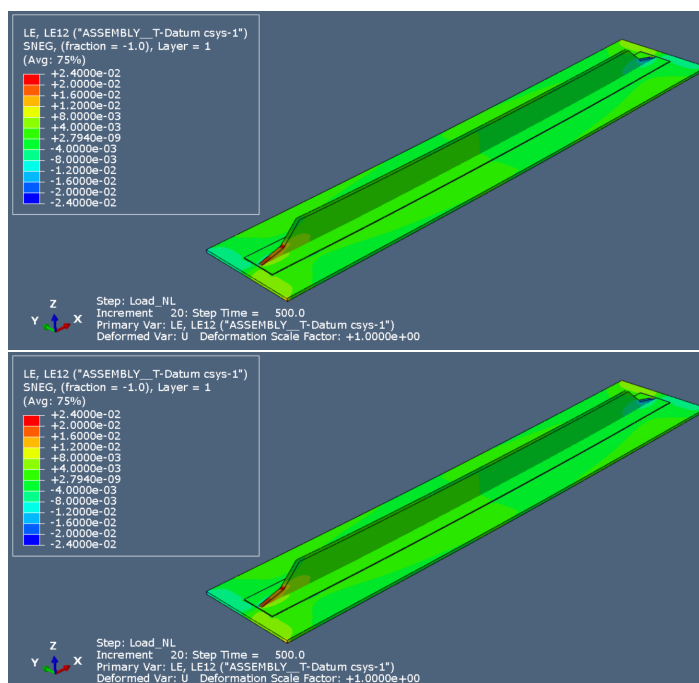


Figura 2.19 Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo).

Por otro lado, se presentan las deformaciones en las bandas extensométricas de los modelos con elementos S4 y S4R obtenidas en el centroide del elemento, comparándose a su vez con los resultados experimentales.

Tomando como referencia la figura 1.15, en primer lugar se representan las deformaciones de las bandas en la parte derecha de la probeta (de la JS01 a la JS06). Posteriormente, se presentan las de la parte izquierda (de la JS07 a la JS12) y por último las de la parte central (de la JS13 a la JS16). Además, se presentan dos columnas en cada figura, siendo las de la izquierda las bandas colocadas en el top de la probeta y las de la derecha las colocadas en el bottom.

Así pues, en la figura 2.20 se presentan las deformaciones de las bandas JS01, JS02, JS03, JS04, JS05 y JS06.

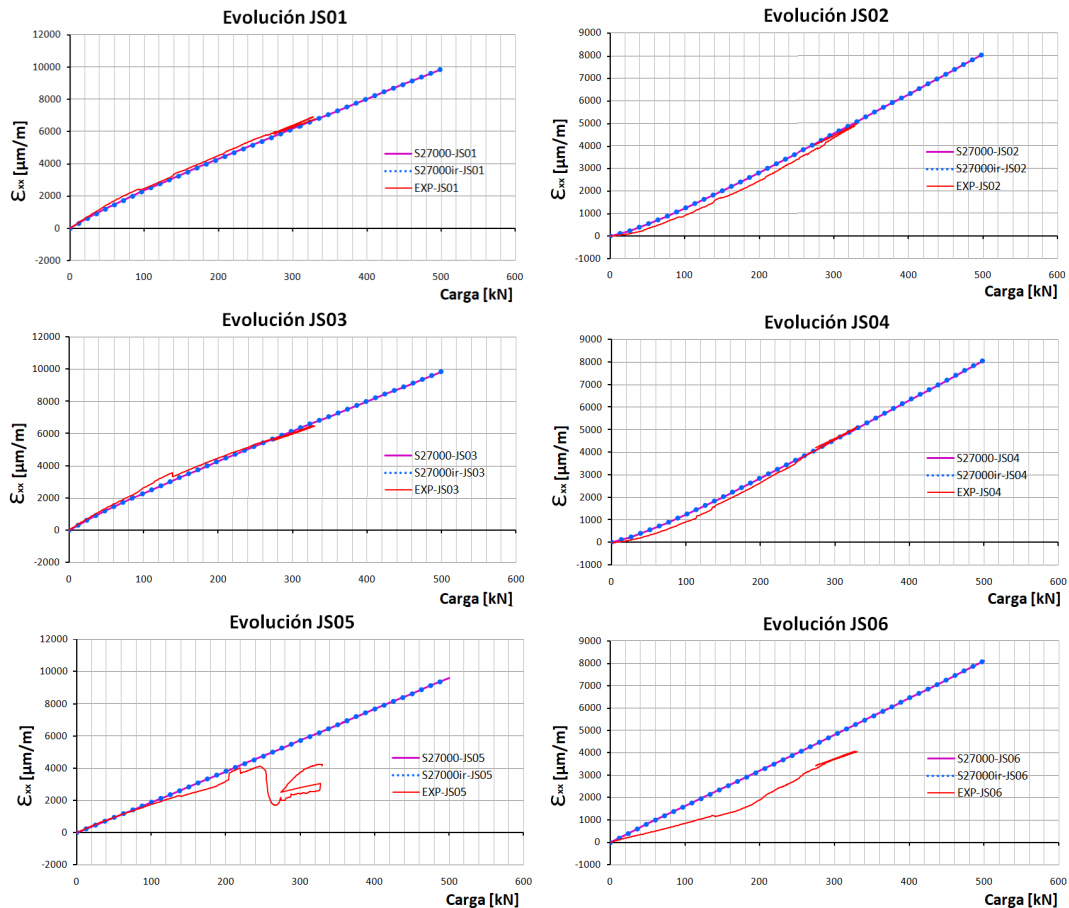


Figura 2.20 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas de la parte derecha de la probeta (considerando figura 1.15).

Desde el punto de vista de la elección de la estrategia a utilizar para el modelado de la probeta, en esta figura se observa que las deformaciones ϵ_{xx} del modelo con integración completa y integración reducida son idénticas para todas las bandas presentadas, hecho que se repite para el resto de bandas del modelo, como se demuestra en las figuras 2.21 y 2.22.

Por otro lado, se tiene que las deformaciones de los modelos numéricos en las bandas JS01, JS02, JS03 y JS04 son prácticamente idénticas a las obtenidas de manera experimental. Sin embargo, en el resultado del ensayo de la banda JS05 se observa que, aunque hasta 130 kN las deformaciones son equivalentes, a partir de ahí difieren, y además se tiene una evolución errática a partir de los 250 kN. Esto puede deberse a un fallo de la banda, o puede que haya fallado el material en la zona y por eso se transfiere menos carga. Por último, en la banda JS06 se obtiene unos resultados experimentales que difieren levemente de los numéricos en un valor que cuando se estabiliza alcanza unos 1000 $\mu\text{m/m}$.

Continuando con la figura 2.21, en esta se presentan las deformaciones de las bandas JS07, JS08, JS09, JS10, JS11 y JS12.

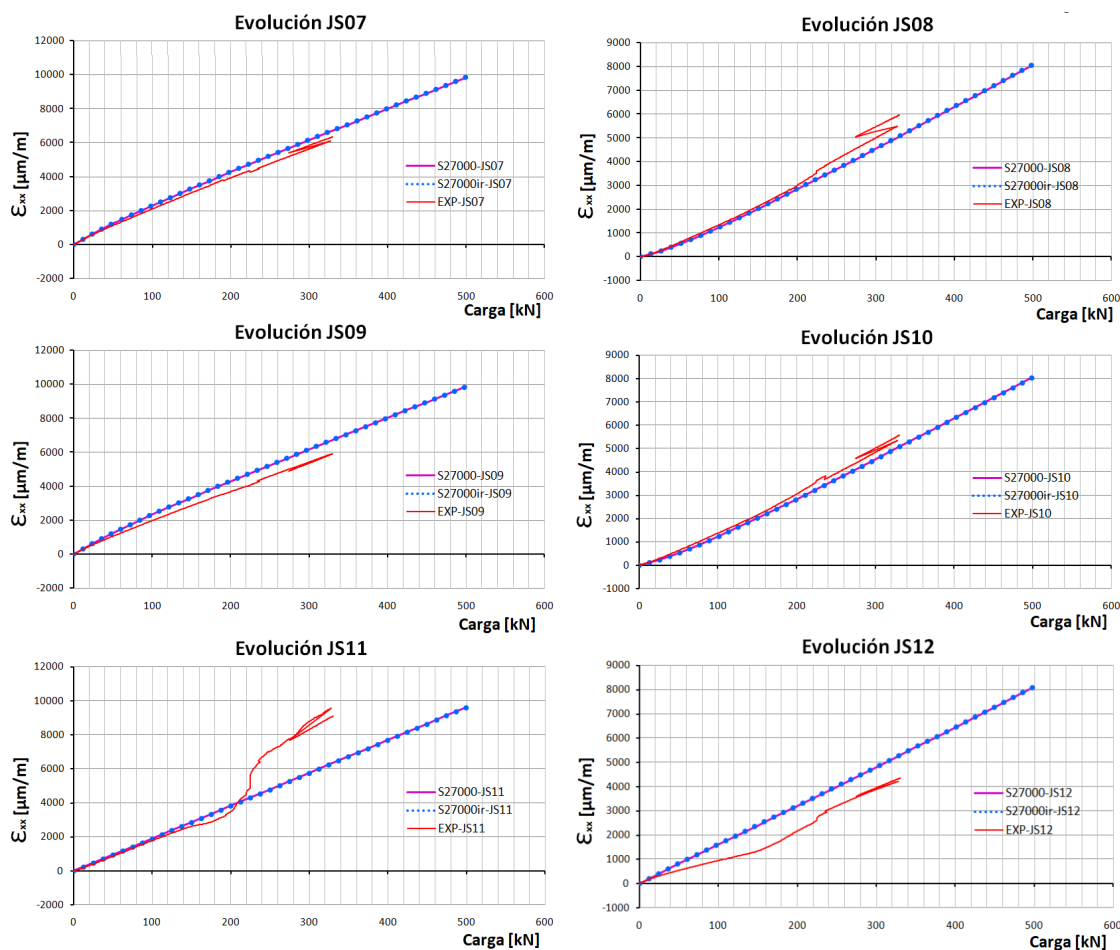


Figura 2.21 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas de la parte izquierda de la probeta (considerando figura 1.15).

De esta figura se deducen unas conclusiones equivalentes a la de la figura 2.20, ya que se tienen resultados similares para el modelo con integración completa e integración reducida y deformaciones casi idénticas entre los modelos numéricos y los resultados experimentales, salvo para la banda JS12 en la que los resultados difieren levemente en un valor que cuando se estabiliza alcanza unos 1000 $\mu\text{m/m}$. La única diferencia remarcable es la de la banda JS11, donde la pendiente de los resultados numéricos y experimentales es similar menos cuando se tiene una carga de 220 kN, que se alcanza una pendiente muy grande.

De hecho, es razonable pensar que en las bandas JS05 y JS11 son las que tienen mayor diferencias en las deformaciones de los modelos numéricos y del ensayo experimental, ya que se sitúan en una zona crítica de la banda al estar en el foot stringer y cerca del runout, siendo por tanto una zona donde se tendrán grandes tensiones y por ello es más propensa al fallo del laminado.

Por último, en la figura 2.22 se presentan las deformaciones en las bandas JS13, JS14, JS15 y JS16.

En esta figura se termina de demostrar que las deformaciones en las bandas de los modelos con elementos S4 y S4R son equivalentes. Además, de la evolución de las bandas JS13 y JS15 se deduce que en la parte superior de la probeta hay compresión en la parte inicial del ensayo, hecho que se explica en el comentario asociado a la figura 2.12. Posteriormente, en la evolución de dichas bandas a partir de los 100 kN se tiene tracción, y se concluye que la evolución es parecida solo que con menor pendiente en el caso experimental hasta llegar a la carga donde se produce el fallo de la probeta, 330 kN. En cuanto a las bandas JS14 y JS16, la

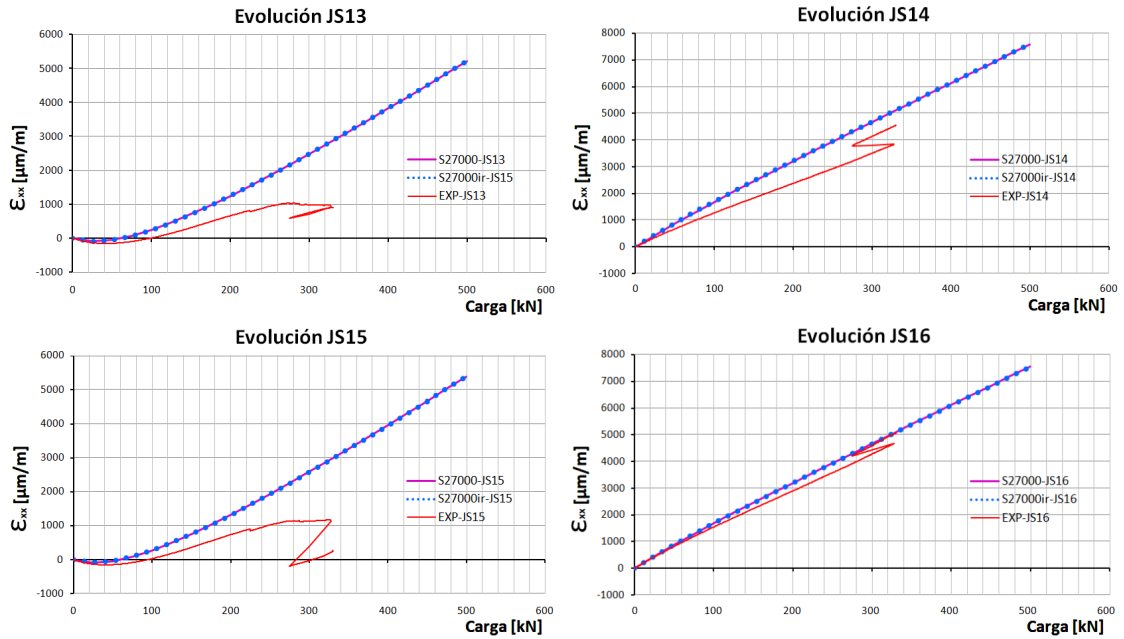


Figura 2.22 Deformaciones ϵ_{xx} de la bandas de la parte central de la probeta (considerando figura 1.15).

evolución de las deformaciones experimentales es similar a la numérica, siendo los resultados prácticamente iguales en el caso de la banda JS16, y en dicho par de bandas se observa el cambio de tendencia en las deformaciones que puede deberse al fallo de la probeta a los 330 kN de carga.

En resumen, se concluye que ambos modelos proporcionan deformaciones casi idénticas y razonablemente ajustadas a las medidas experimentales, ya que los resultados numéricos y experimentales difieren al ocurrir en el ensayo efectos no lineales que no se han tenido en cuenta en los modelos numéricos, como podría ser el fallo de una banda o el fallo del material en una zona. Por tanto, tras quedar corroborados los resultados de los modelos numéricos, la diferencia entre los resultados numéricos y experimentales de la figura 2.13 puede deberse a los comentarios asociados a esa figura.

2.3.3 Tensiones

A continuación se presentan para ambos modelos la máxima tensión σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} para la skin, el foot stringer y el web stringer, así como la lámina donde estas se producen. Para ello, se emplea el sistema de coordenadas *Default* para que así la dirección 1 sea la dirección de la fibra y la dirección 2 sea la transversal a la misma, y se obtienen las tensiones en los puntos de integración.

Comparar estos resultados en ambos modelos resulta de interés ya que si bien las deformaciones son prácticamente similares y por tanto también lo son las tensiones sin más que aplicar la ley de comportamiento para calcularlas, obtener las tensiones máximas y dónde se producen puede aportar información extra sobre las diferencias entre los elementos S4 y S4R.

Dicho esto, para el caso de la shell con integración completa tenemos:

Tabla 2.1 Máximas tensiones en el modelo con elementos S4.

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	1
Orientación	0°	45° y -45°	-45°
Valor	3.411 GPa	2.148 GPa	2.775 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	3	2
Orientación	90°	90°	45°
Valor	0.1387 GPa	0.1270 GPa	0.1330 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	5	3
Orientación	45°	45° y -45°	90°
Valor	-0.1144 GPa	0.1013 GPa	0.09644 GPa

Analizando los resultados presentados se concluye que las tensiones en dirección de la fibra son un orden o dos superior a la dirección transversal o tangencial a la misma, y si se estudian los resultados lámina a lámina se observa un aumento progresivo de las tensiones σ_{11} desde la lámina 1 hasta la última lámina tanto de la skin como del foot stringer, hecho que es razonable teniendo en cuenta que la explicación asociada a la figura 2.12 y que la evolución de las deformaciones es lineal en el espesor.

Además, obteniendo las tensiones σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} de todas las láminas se concluye que, como cabría esperar:

- Las láminas a 0° son las que tienen mayor σ_{11} , siendo menores la de las láminas a 45° y -45° y de un orden inferior las de 90°. Resulta razonable que esto ocurra ya que las deformaciones sobre las láminas varían linealmente desde el top al bottom y las láminas a 0° son mas rígidas teniendo en cuenta que la dirección de la carga es la del eje x.
- Las láminas a 45° y a -45° son las que tienen mayor σ_{22} y σ_{12} , siendo un orden inferior las tensiones en las de 0° y las de 90°. La razón es totalmente equivalente a la del caso de la σ_{11} y las láminas a 0°.
- Lo anteriormente comentado no se refleja en la tensión máxima σ_{11} debido a que esta se da en las esquinas del runout por el hecho de ser esquinas. Sin embargo, si se estudian las tensiones en otras zonas del web stringer, se cumple lo concluido con anterioridad.

Por otro lado, se presentan las tensiones máximas para el caso de las standard shell con integración reducida.

Tabla 2.2 Máximas tensiones en el modelo con elementos S4R.

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	1
Orientación	0°	45° y -45°	-45°
Valor	3.125 GPa	2.161 GPa	2.368 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	3	2
Orientación	90°	90°	45°
Valor	0.1285 GPa	0.1231 GPa	0.1143 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	5	3
Orientación	45°	45° y -45°	90°
Valor	-0.1054 GPa	0.08937 GPa	0.08136 GPa

Comparando las tablas 2.1 y 2.2 se observa que las láminas en las que se tiene mayor tensión son las mismas. Sin embargo, el valor de las tensiones máximas difieren, siendo la máxima diferencia del 14 %. Esto se debe a que las tensiones máximas se producen en las esquinas, donde según la teoría de la Elasticidad las tensiones tienden a infinito, y como en el caso de la integración completa los puntos de integración de Gauss están más próximos a las esquinas del elemento, estos registran mayor valor que en el caso de la integración reducida, cuyo único punto de integración está en el centro del elemento. Sin embargo, obteniendo las tensiones σ_{11} en el centroide del elemento en un caso y otro se concluye que las diferencias son del orden del 0.1 %-0.2 %, al menos para 5 elementos observados a lo largo del modelo y elegidos al azar.

Por tanto, a modo resumen se concluye que los resultados en tensiones de los modelos con elementos S4 y S4R son prácticamente equivalentes, si bien los valores máximos de las tensiones pueden variar ligeramente.

Finalmente, se presenta el campo tensional σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} de algunas láminas en las que se alcanza la tensión máxima para alguna de las partes del modelo definido con elementos S4. En estas representaciones se obvia el campo tensional con elementos S4R ya que se ha demostrado a lo largo del capítulo que es prácticamente similar al del S4.

En la figura 2.23 se observa el pronunciado gradiente obtenido en la lámina 19 de la skin, donde de hecho se alcanza la máxima tensión longitudinal, y por tanto, podría ser un punto de rotura.

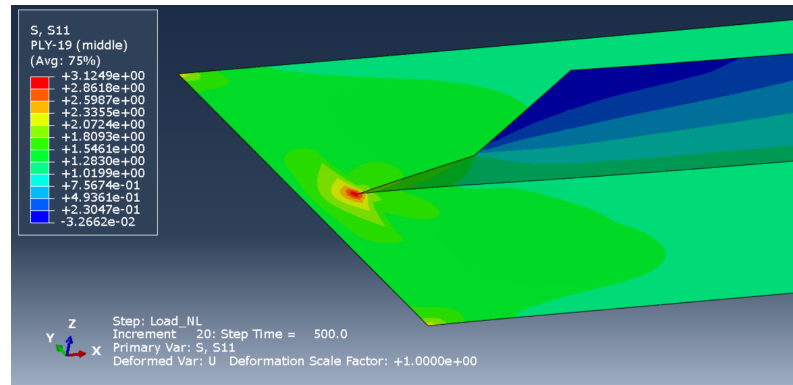


Figura 2.23 Campo de tensiones σ_{11} en la lámina 19 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo con elementos S4.

Además, en las figuras 2.23 y 2.24 se observa que existe simetría con respecto al web stringer en la skin y en el foot stringer.

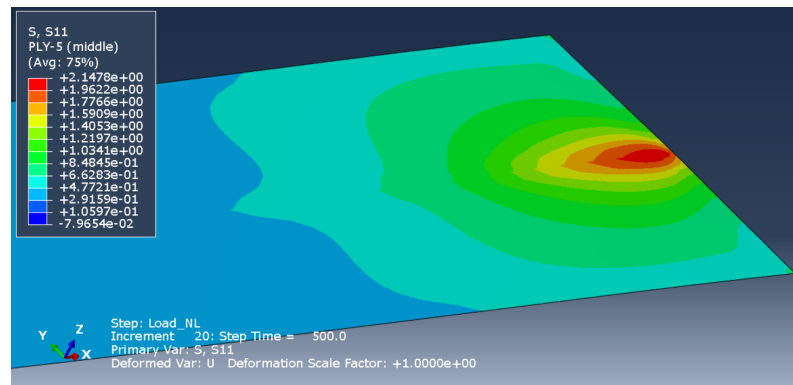


Figura 2.24 Campo de tensiones σ_{11} en la lámina 5 del foot stringer (45° izquierda y -45° derecha) del modelo con elementos S4.

Por otro lado, en la figura 2.24 se justifica por qué la tensión σ_{11} máxima en el foot para el caso de la shell con integración completa no es mayor que en el de la integración reducida. En efecto, el máximo no se da en una esquina del modelo, y por tanto, no se obtiene mayor tensión en el modelo con elementos S4 al tener los puntos de integración más próximos a la esquina donde se produce la tensión teórica infinita.

Destacar de la figura 2.25 los puntos donde se alcanzan las máximas tensiones transversales, estos son, las dos esquinas del runout más próximas a la unión con el foot stringer.

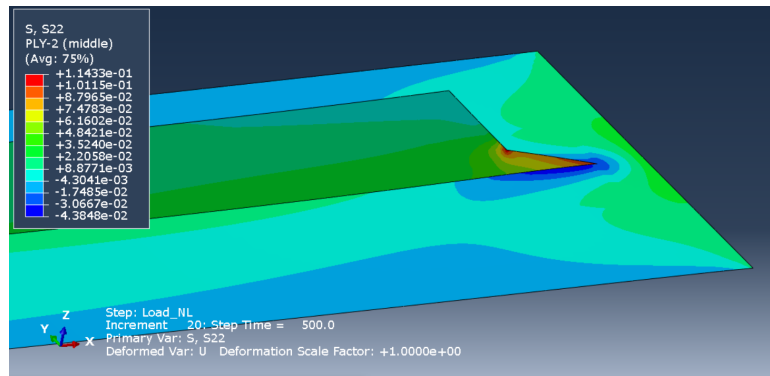


Figura 2.25 Campo de tensiones σ_{22} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo con elementos S4.

Se observa cierta simetría con respecto al web stringer en los resultados de la figura 2.26. Esto se debe a que en la parte izquierda del foot stringer ($Y > 0$) se tienen las láminas a 45° , mientras que en la parte derecha se las láminas están a -45° .

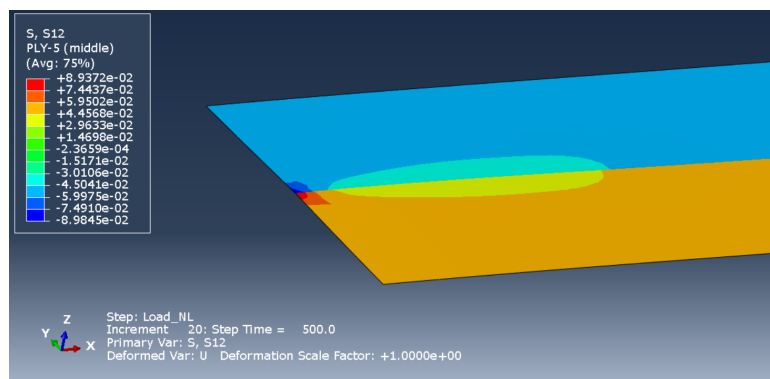


Figura 2.26 Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 5 del foot stringer (45° izquierda y -45° derecha) del modelo con elementos S4.

En la figura 2.27 se vuelve a observar el aumento de las tensiones en las dos esquinas del runout, en este caso las tensiones tangenciales.

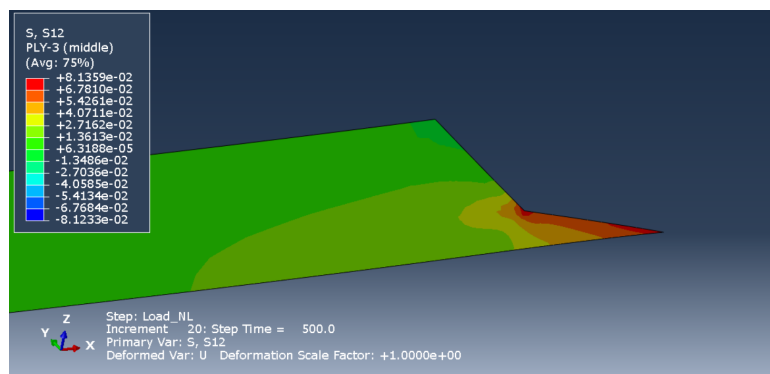


Figura 2.27 Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 3 del web stringer (90°) del modelo con elementos S4.

Tras los resultados presentados en este apartado, se concluye que elegir entre elementos standard shell con integración completa e integración reducida no afecta prácticamente a los valores de las tensiones obtenidas en el centroide del elemento pero si afecta si se obtienen en los puntos de integración, y que no altera donde se producen las tensiones máximas.

3 MODELOS CON CONTINUUM SHELL

En este capítulo se describe los modelos realizados en ABAQUS para modelar la probeta utilizando elementos continuum shell (apartado 3.1) y se presentan los resultados de dichos modelos comparándolos con las deformaciones de las bandas del ensayo de tracción y con los resultados de los modelos con elementos standard shell (apartado 3.2).

3.1 Descripción de los modelos

En primer lugar, al modelar la probeta utilizando elementos SC8R se ha decidido considerar el foot stringer y el web stringer como una sola pieza, llamada “stiffener”. Por tanto, el módulo *Part* no solo difiere en el del shell en que ahora todas las *parts* son creadas con *Shape* de tipo *Solid*, sino que además ahora el modelo tendrá 5 *parts* distintas, la “skin”, el “stiffener”, el “gage-skin”, el “gage-foot-stringer” y el “gage-web-stringer”, siendo estos 2 últimos nombrados así por su colocación dentro de la probeta.

Para definir la *part* “stiffener” se realiza una extrusión del perfil y se hace un vaciado mediante planos de corte para obtener la geometría de los runouts. Para definir la *part* “skin” se tiene en cuenta que ahora es un sólido, y las bandas se modelan como una superficie.

En el módulo *Mesh* se realizan particiones sobre la skin y sobre la parte inferior del stiffener para que las semillas de mallado coincidan en la zona de unión del stiffener con la skin. Además, se asignan a la skin y al stiffener elementos del tipo continuum shell lineales con un elemento en el espesor de cada lámina, salvo en el web, donde se han incluido dos elementos en el espesor. Hecho esto, se asigna la *stack direction* de los elementos, que queda representado en la figura 3.1 en la mayor parte del modelo.

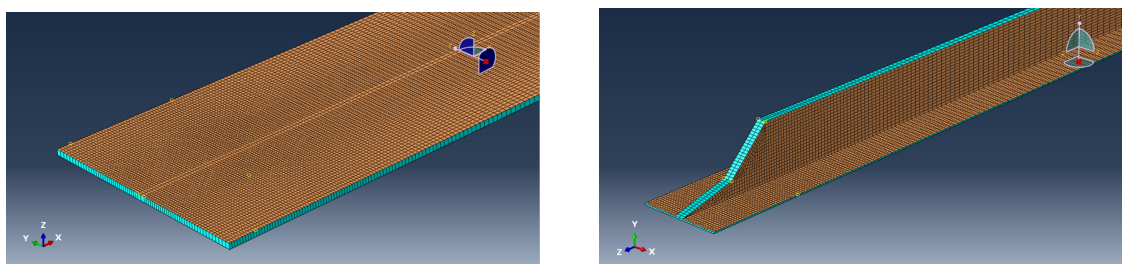


Figura 3.1 Orientación de los elementos en la skin (izquierda) y en el stiffener (derecha) para los modelos con elementos SC8R, donde el color marrón denota la superficie positiva.

Cabe mencionar que los elementos asignados a las bandas de la piel y de la zona del stiffener asociada al foot stringer son elementos tipo *membrane* lineal, y para los de la zona del web stringer serán de nuevo de tipo *truss* lineal.

En el módulo *Property* se definen los materiales “IMA/M21EV” y “GAGE”, las secciones de las bandas y los composites layups. El haber unido el foot stringer y el web stringer en una sola *part* llamada stiffener trae consigo dos estrategias distintas para modelar el laminado de la zona común entre el foot stringer y el web stringer:

1. **Modelo SC8R-Foot**, se asigna el laminado del foot stringer (figura 3.2 izquierda).
2. **Modelo SC8R-Web**, se asigna el laminado del web stringer (figura 3.2 derecha).

Nótese en la figura 3.2 que como el laminado derecho e izquierdo del foot stringer son distintos, es necesario hacer una partición en la mitad del foot stringer, por lo que para que el mallado en la zona de unión entre el web stringer y el foot stringer sea el mismo se incluyen dos elementos en el espesor del web. En la zona izquierda del web stringer se asignan las láminas 1-15 y la zona derecha la de las láminas 16-30 del laminado presentado en la tabla 1.3.

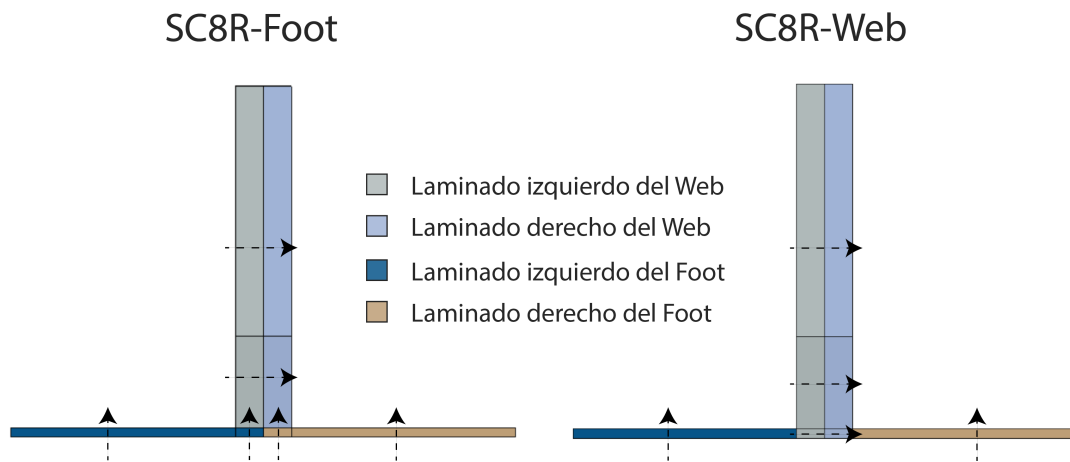


Figura 3.2 Esquema de las dos estrategias seguidas para el modelado de la probeta con elementos SC8R, donde se muestra los laminados para cada zona del stiffener y la dirección de apilado.

Mencionar que, teniendo en cuenta que en la figura 3.2 el espesor de la zona del foot stringer y del web stringer están a escala, y recordando la explicación asociada a la figura 1.17, es razonable pensar que la estrategia que parece más realista es la SC8R-Web.

En el módulo *Assembly* se crea una *instance* para cada una de las 16 bandas extensométricas del ensayo de tracción, y se crean y se posicionan las *instances* asociadas a la skin y el stiffener, sobre las cuales se posicionan cada una de las bandas extensométricas.

Por último, en los módulos *Step*, *Interaction* y *Load* se siguen los mismos pasos que en los modelos con standard shell, solo que ahora simplemente hay que hacer una *tie constraint* entre el stiffener (esclavo) y una zona particionada de la skin con el mismo tamaño que la base del stiffener (maestro), y que al definirse las bandas como elementos de tipo membrane las *tie constraints* se realizan seleccionando la superficie de unión según corresponda (de manera similar a como se pegaría una banda a una superficie en la realidad).

En la figura 3.3 se visualiza la probeta en el módulo *Interaction* para el modelo SC8R-Web. Para el modelo SC8R-Foot se obtiene exactamente la misma figura, ya que las particiones y las constraints realizadas son las mismas. Destacar que el bottom de la skin y de las zonas del stiffener asociadas al foot stringer y al web stringer son las superficies ocultas en esa vista, al igual que ocurre en el capítulo 2 con la figura 2.3.

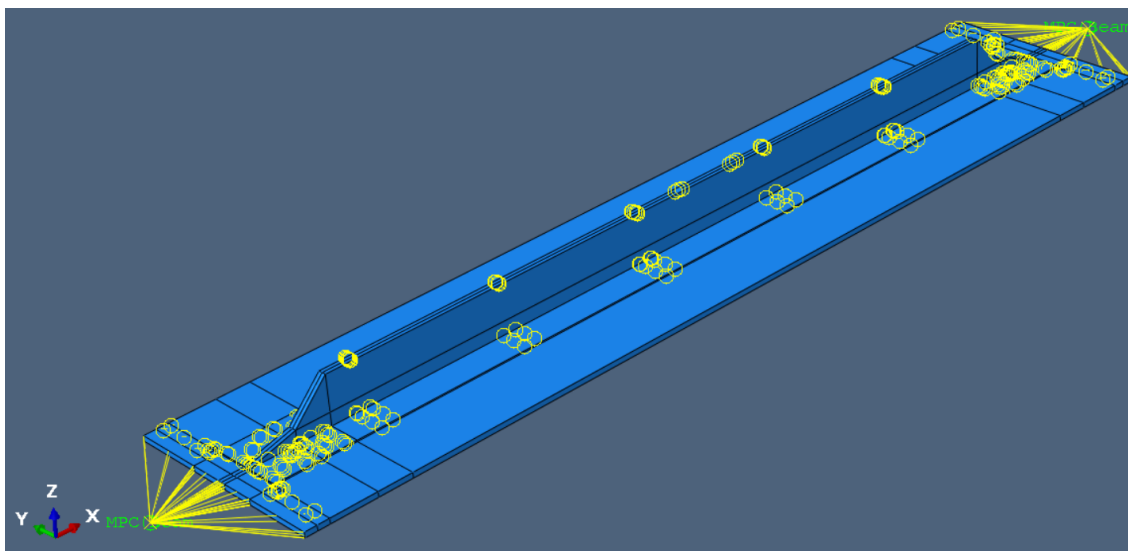


Figura 3.3 Vista en el módulo *Interaction* del modelo SC8R-Web.

3.2 Resultados

Una vez descrita la elaboración de los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web, se procede a comparar los resultados de dichos modelos con los resultados experimentales y con los del modelo con elementos standard shell.

En el apartado 3.2.1 se presenta la deformada, el campo de desplazamientos y la curva carga desplazamiento, en el apartado 3.2.2 se presentan los campos de deformaciones en las láminas top y bottom de la probeta, así como las deformaciones en las bandas, y en el apartado 3.2.3 se muestran las tensiones máximas en el modelo, los campos tensionales de algunas láminas donde se dan dichas tensiones y finalmente se estudia el promedio de las tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} .

Destacar que en la representación de los resultados se harán referencia a los tres sistemas coordenados comentados al principio del capítulo 2 y representados en las figuras 2.1 y 2.2.

3.2.1 Desplazamientos

En primer lugar, en las figuras 3.4 y 3.5 se presentan respectivamente el campo de desplazamientos u_x y u_z sobre los modelos S4, SC8R-Web y SC8R-Foot en el sistema de referencia *Global*, estando la deformada escalada con un factor de escala de 10 para visualizarla con claridad.

Observando ambas figuras se concluye que los campos de desplazamientos son prácticamente equivalentes para los 3 modelos, por tanto, no se tienen diferencias en los desplazamientos obtenidos en la probeta utilizando los elementos shell y los continuum shell, sin influir además como se modela la zona común del foot stringer y del web stringer.

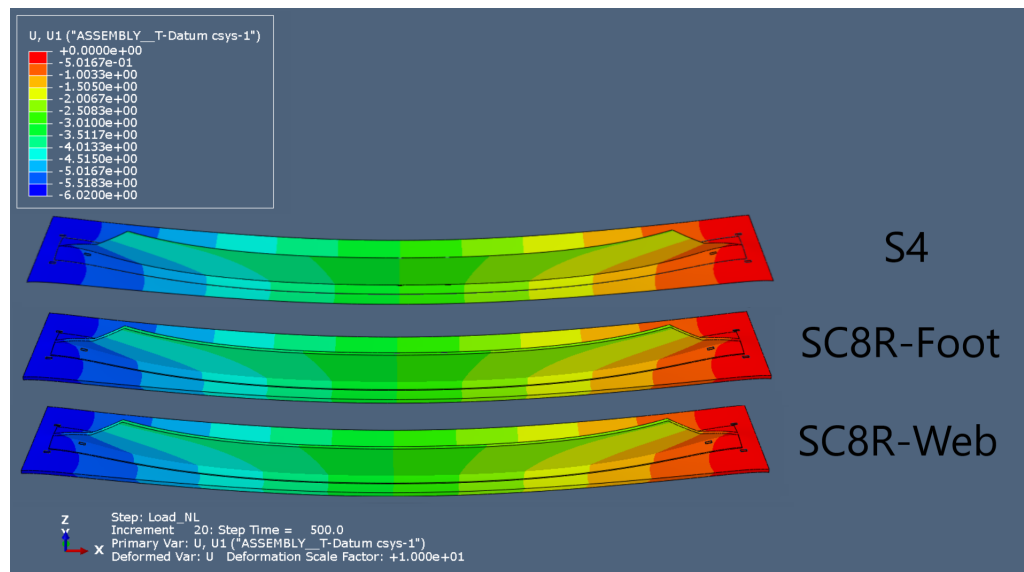


Figura 3.4 Desplazamientos u_x y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos SC8R.

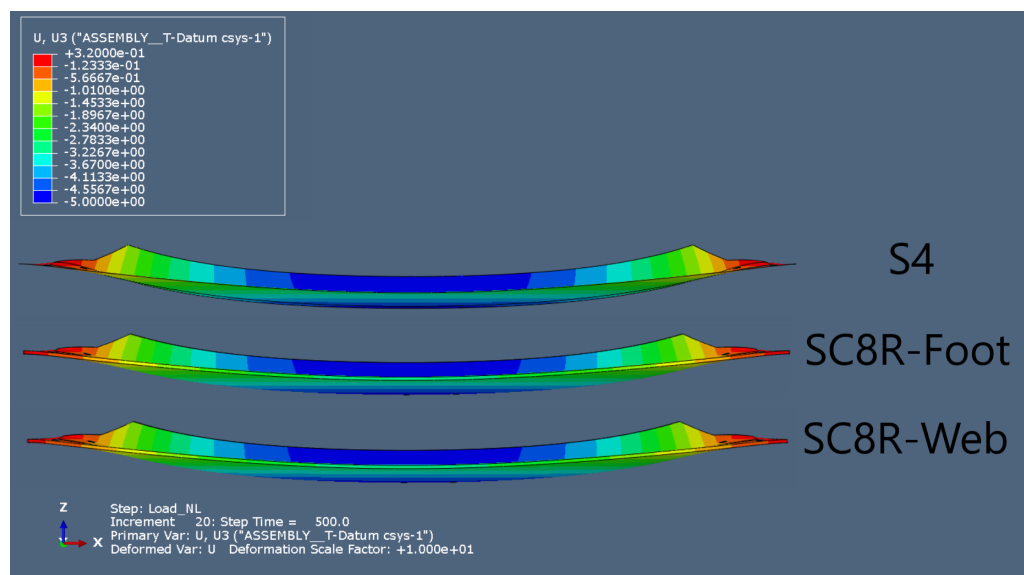


Figura 3.5 Desplazamientos u_z y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos SC8R.

Por otro lado, en la figura 3.6 se presenta el desplazamiento en el extremo de la probeta frente a la carga aplicada. Se observa como los tres modelos numéricos presentados en la figura tienen prácticamente la misma rigidez, y por tanto el comportamiento global de los tres modelos es el mismo.

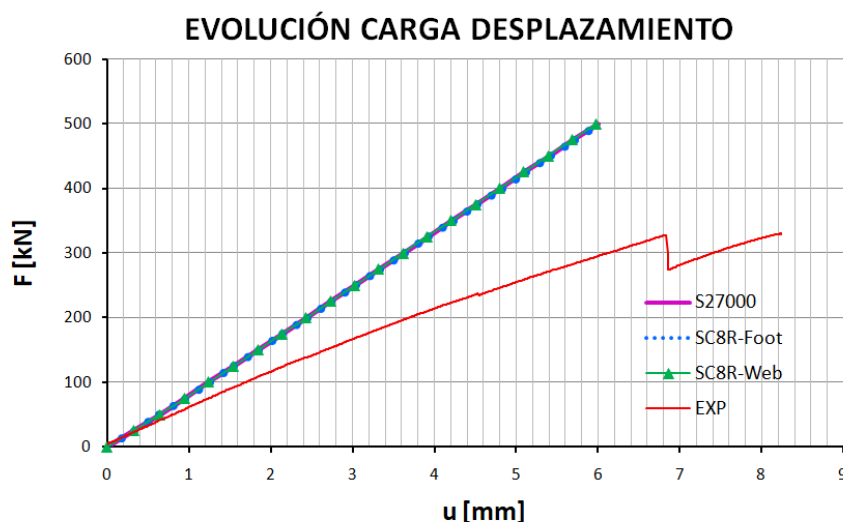


Figura 3.6 Comparación de la evolución carga desplazamiento para los modelos con continuum shell frente al modelo con elementos S4 y los resultados experimentales.

3.2.2 Deformaciones

A continuación se presentan las deformaciones sobre las láminas en el top y en el bottom de la probeta en los modelos S4, SC8R-Foot y SC8R-Web, para compararlos y además tener una perspectiva global de los resultados del problema.

En concreto, el campo de deformaciones ϵ_{xx} se presenta en la figura 3.7 para las láminas del top y en la figura 3.8 para las láminas del bottom. Se sigue el mismo esquema para las deformaciones ϵ_{yy} presentadas en las figuras 3.9 y 3.10, y para las deformaciones ϵ_{xy} presentadas en las figuras 3.11 y 3.12. Mencionar que en dichas figuras aparecen las bandas extensométricas ya que contribuye a conocer la zona de la probeta que se está representando y la colocación de la misma, y no es objetivo en estas figuras hacer una descripción de los resultados de las bandas.

En las figuras mencionadas en el párrafo anterior se observa que las deformaciones sobre la probeta son prácticamente similares en las zonas donde es razonable compararlas, es decir, en todas las zonas menos en la zona común entre el foot stringer y el web stringer, ya que el modelado de dicha zona es distinto para el modelo SC8R-Foot y SC8R-Web al tenerse distintos laminados. Por tanto, el comportamiento global de los 3 modelos es similar.

Mencionar que las conclusiones obtenidas en el capítulo 2 son de nuevo de aplicación, y que en el caso de las deformaciones ϵ_{12} se hace un zoom en la zona del runout para ver con mayor nitidez el campo de deformaciones sin perder información ya que se sigue cumpliendo que los resultados son antisimétricos con respecto al web stringer y a la parte central de la probeta.

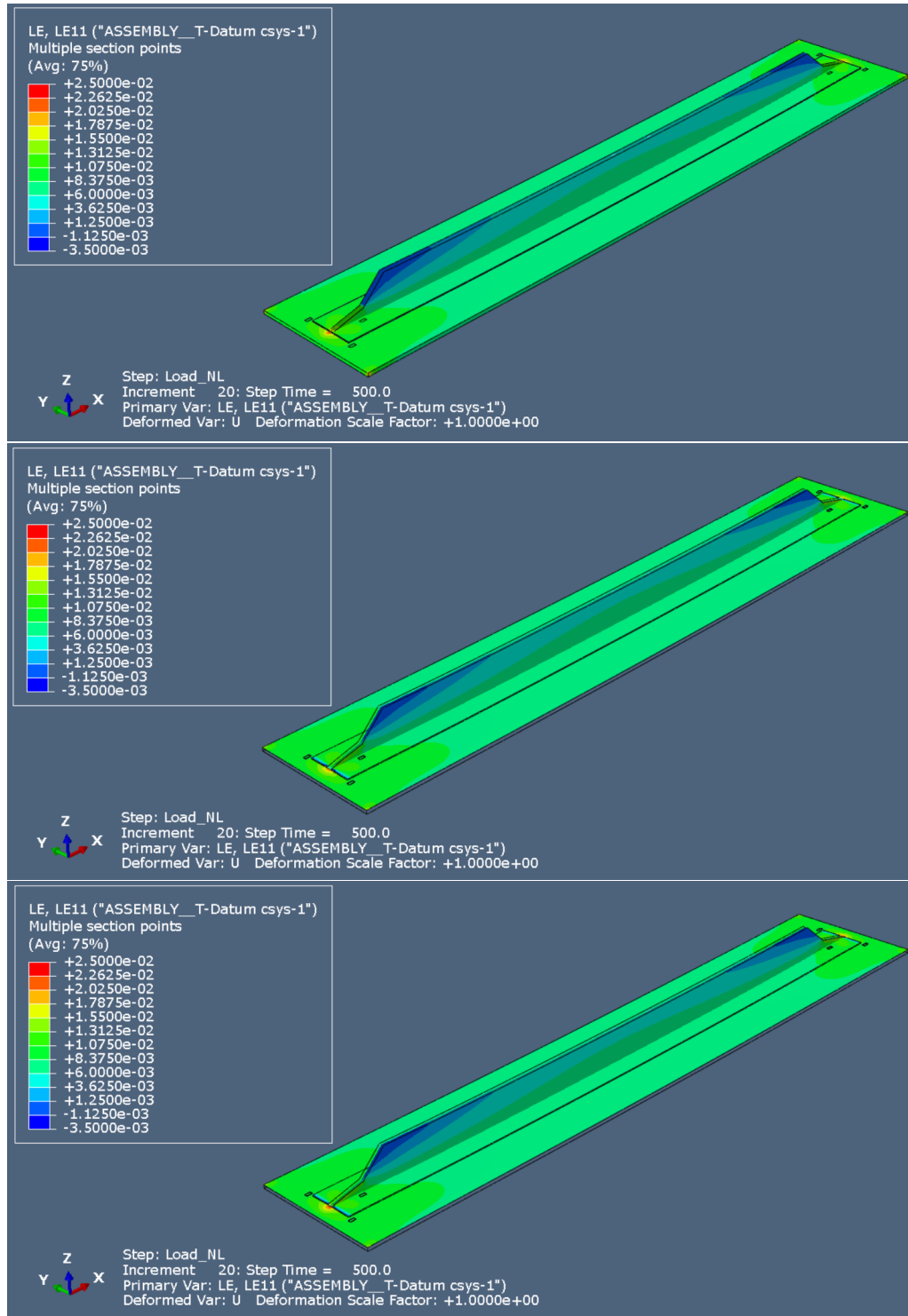


Figura 3.7 Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo).

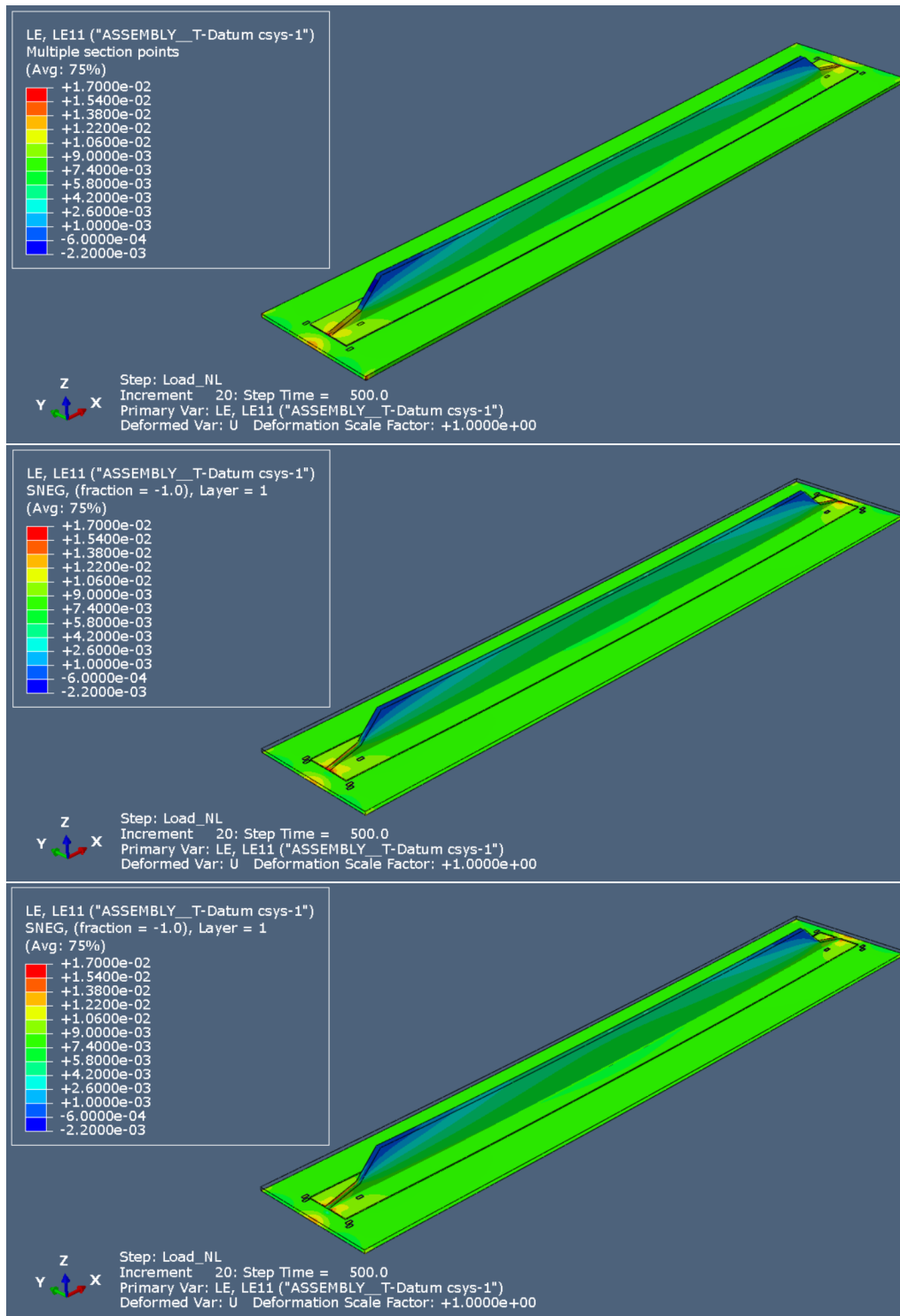


Figura 3.8 Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo).

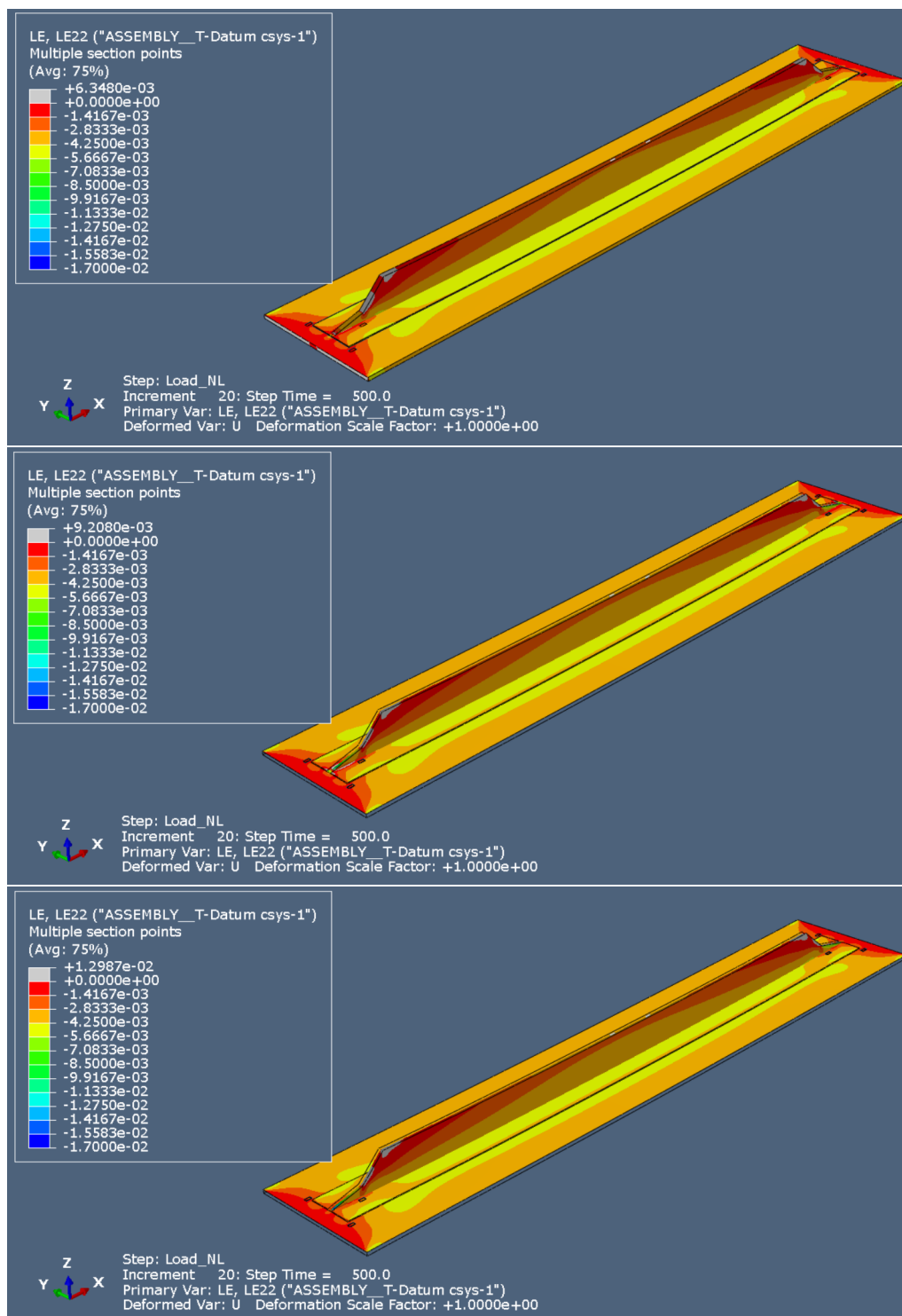


Figura 3.9 Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo).

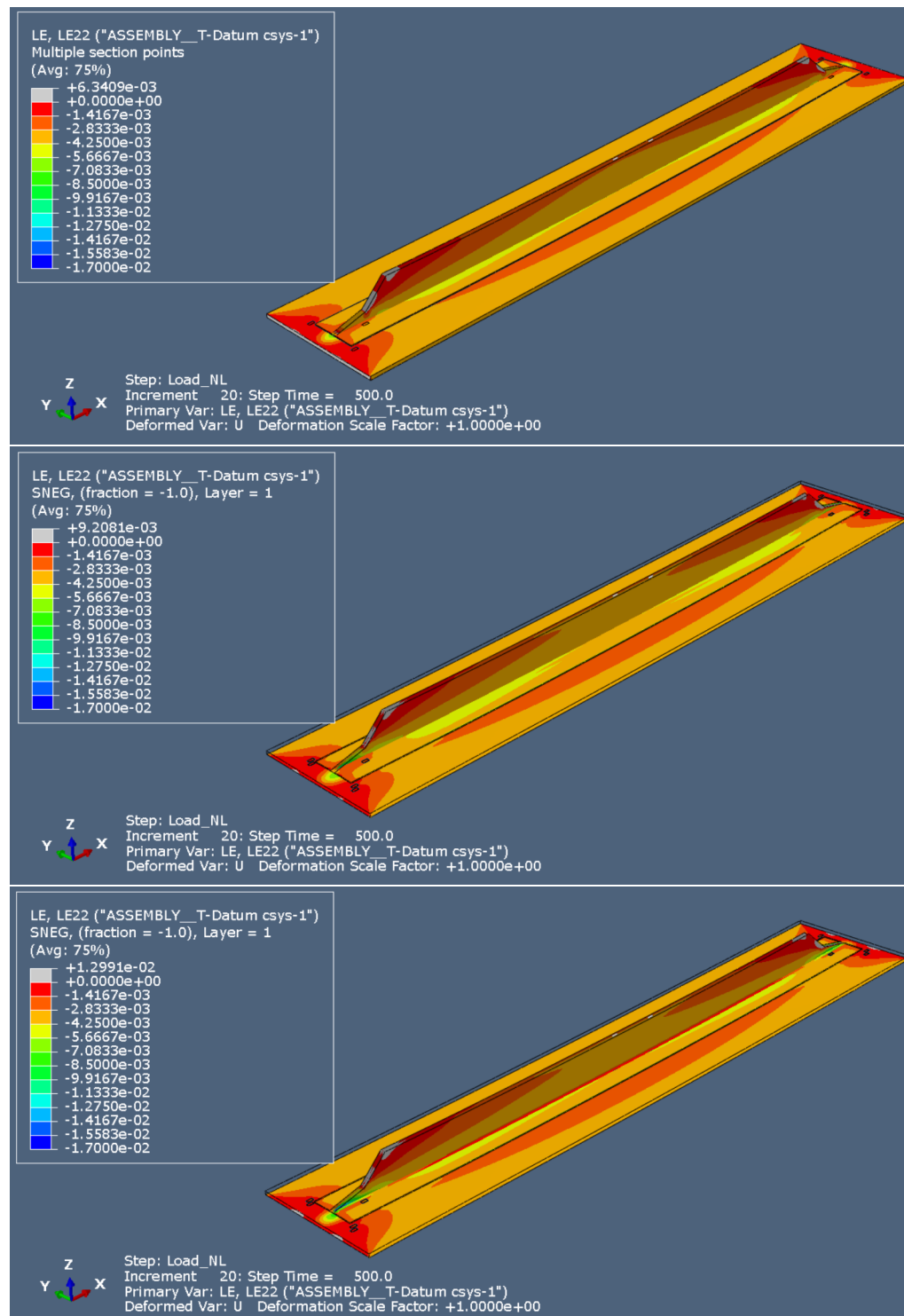


Figura 3.10 Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo).

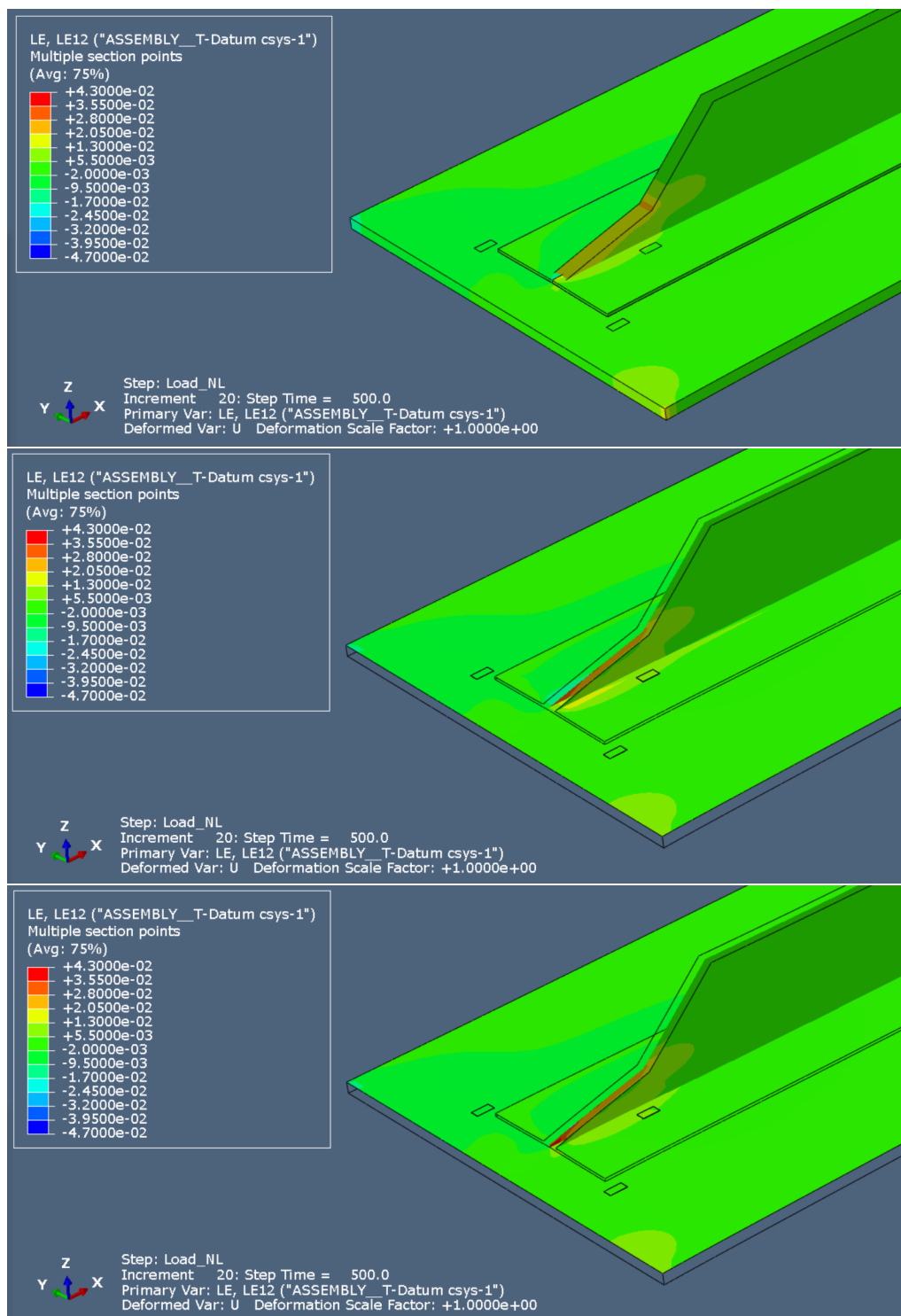


Figura 3.11 Campo de deformaciones ε_{xy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo).

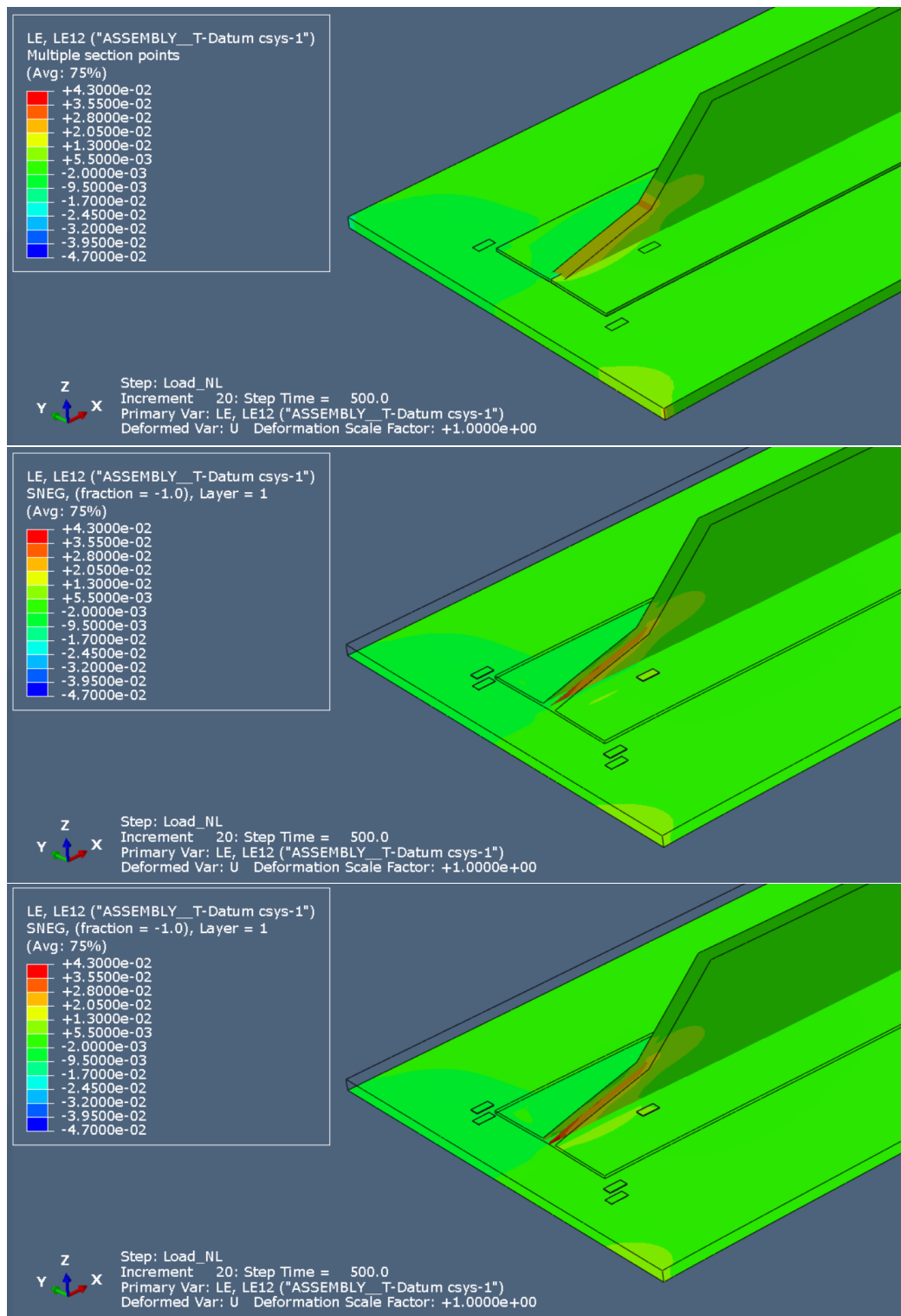


Figura 3.12 Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo).

Por otro lado, se presentan las deformaciones en las bandas extensométricas de los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web obtenidas en el centroide del elemento, comparándose a su vez con las del modelo S4 y con los resultados experimentales.

En la figura 3.13 se representan las deformaciones en las bandas JS01 y JS02, en la figura 3.14 las de las bandas JS11 y JS12 y en la figura 3.15 las de las bandas JS13, JS14, JS15 y JS16. Se observa que los resultados de los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web prácticamente coinciden, y son muy similares a los resultados del modelo S4 en todas las bandas menos en la JS13 y JS15, donde se obtienen resultados muy parecidos ya que las deformaciones tan solo se diferencian en unos 200 $\mu\text{m/m}$ como máximo. Por otro lado, los resultados numéricos en la banda JS13 son prácticamente iguales a los de la banda JS15 ya que las bandas están colocadas próximas entre sí y en una zona muy alejada de los runouts.

Mencionar que no se presentan el resto de bandas porque el campo de deformaciones ϵ_{xx} es simétrico con respecto a la parte central de la probeta y con respecto al web stringer tal y como se observa en las figuras 3.7 y 3.8, y dada la posición de las bandas en la probeta (ver figura 1.15) las bandas JS03, JS04, JS07, JS08, JS09 y JS10 tienen la misma evolución numérica que las bandas JS01 y JS02, y lo mismo ocurre con las bandas JS05 y JS06 y las bandas JS11 y JS12. Por tanto, las conclusión obtenida sobre la similitud en las deformaciones de las bandas de los modelos SC8R-Foot, SC8R-Web y los modelos con elementos shell se alcanzaría de forma similar si se presentasen todas las bandas, y de la manera elegida en este documento se evita caer en redundancias.

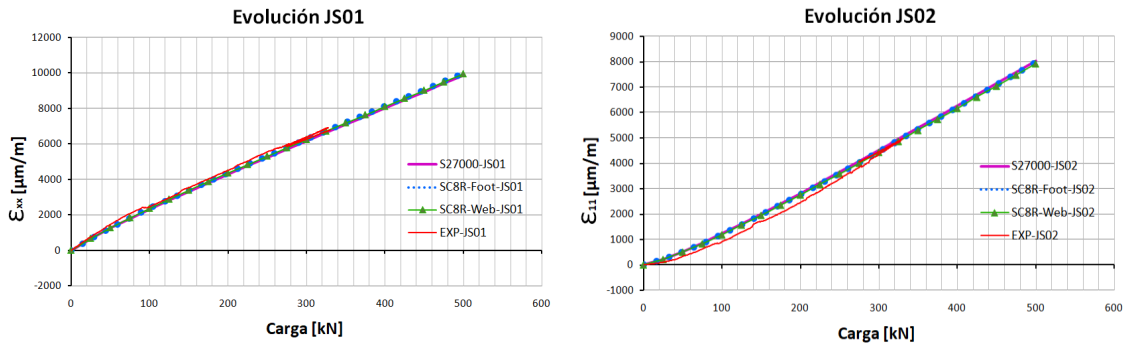


Figura 3.13 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS01 y JS02 de los modelos con continuum shell y del modelo S4.

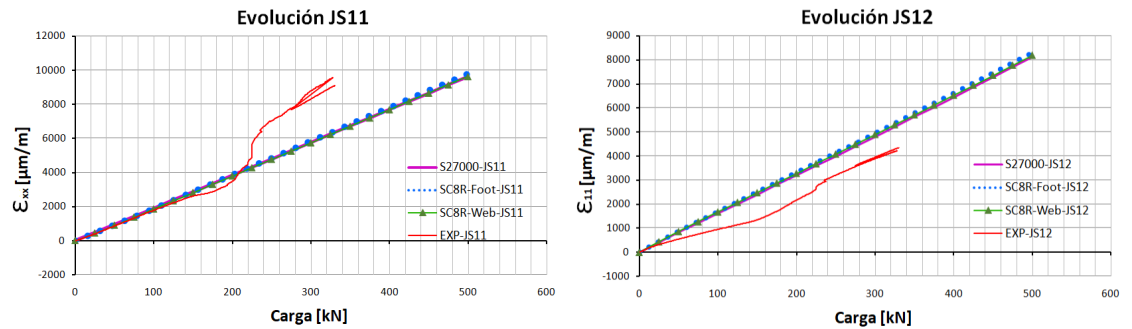


Figura 3.14 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS11 y JS12 de los modelos con continuum shell y del modelo S4.

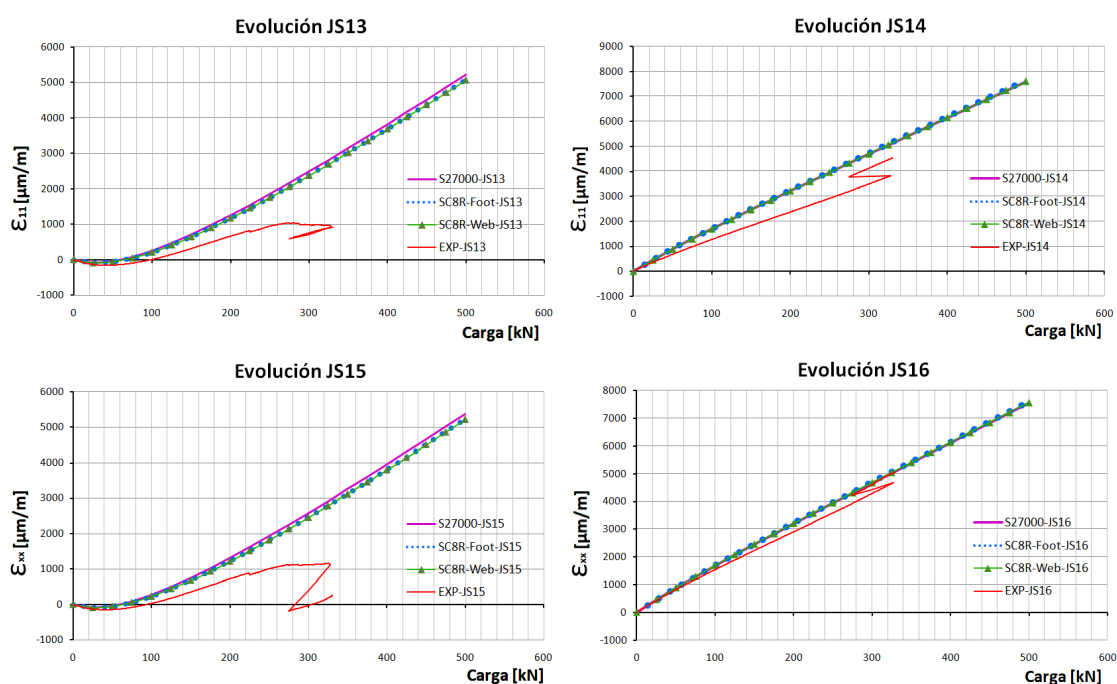


Figura 3.15 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS13, JS14, JS15 y JS16 de los modelos con continuum shell y del modelo S4.

En resumen, se concluye que los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web proporcionan deformaciones casi idénticas a los modelos S4 y S4R, y sus resultados se ajustan razonablemente a las medidas experimentales.

3.2.3 Tensiones

A continuación se presentan para los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web las máximas tensiones en la skin, en el foot stringer y en el web stringer, así como las láminas donde estas se producen, obteniendo dichos resultados empleando el sistema de coordenadas *Default*.

A pesar de que en el documento siempre se toma como referencia el modelo shell con integración completa para comparar los distintos elementos, las tensiones máximas en los modelos SC8R se comparan con el modelo shell con integración reducida, ya que así se anula el efecto en los resultados de la distinta posición de los puntos de integración de Gauss.

Se repite las tablas de los resultados del modelo S4R presentadas en el capítulo 2 para mayor facilidad en la lectura del documento.

Tabla 3.1 Máximas tensiones en el modelo con elementos S4R (2º vez).

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	1
Orientación	0°	45° y -45°	-45°
Valor	3.125 GPa	2.161 GPa	2.368 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	3	2
Orientación	90°	90°	45°
Valor	0.1285 GPa	0.1231 GPa	0.1143 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	5	3
Orientación	45°	45° y -45°	90°
Valor	-0.1054 GPa	0.08937 GPa	0.08136 GPa

Tabla 3.2 Máximas tensiones en el modelo SC8R-Foot.

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	13
Orientación	0°	45° y -45°	45°
Valor	2.665 GPa	1.974 GPa	2.295 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	5	3
Orientación	90°	45° y -45°	90°
Valor	0.1136 GPa	0.1030 GPa	0.09853 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	1	15
Orientación	45°	45° y -45°	0°
Valor	-0.08699 GPa	0.07962 GPa	0.1333 GPa

En primer lugar, comparando las tablas 3.1 y 3.2 se concluye que las tensiones en el modelo con continuum shell son menores en todos los casos menos en la máxima σ_{12} del web stringer.

En cuanto a las láminas donde se producen las tensiones máximas, en ambos modelos se obtienen las mismas láminas en el caso de la skin, mientras que en el foot stringer y en el web stringer solo se obtiene la misma lámina en la máxima σ_{11} del foot stringer. Esto puede deberse a que, mientras que el modelado de la skin simplemente ha pasado a ser con geometría 3D, ahora se modela con mayor detalle la zona común entre el foot stringer y el web stringer, y dicha zona y la unión entre el foot stringer y el web stringer es la zona más propensa a producirse las tensiones máximas. Sin embargo, para los casos en los que no coinciden las láminas, si se obtienen en el modelo con elementos S4R las tensiones en las láminas donde se tienen las máximas tensiones para el modelo SC8R-Foot se observa que su valor es muy próximo al obtenido en las láminas con tensiones máximas para el modelo con elementos S4R (máxima diferencia de 0.05 GPa), por lo que los resultados del modelo S4R se aproximan al del modelo SC8R-Foot.

En cuanto a la orientación de las láminas donde se producen las tensiones máximas, recordando lo comentado en el capítulo 2 lo razonable es que las láminas a 0° son las que tienen mayor σ_{11} , y las láminas a 45° y a -45° son las que tienen mayor σ_{22} y σ_{12} . Esto no ocurre para la tensión máxima σ_{11} y la máxima σ_{12} debido a que estas se dan en las esquinas del runout por el hecho de ser esquinas. Sin embargo, si se estudian las tensiones en otras zonas del web stringer, se cumple lo comentado con anterioridad.

Por otro lado, en la tabla 3.3 se presentan las tensiones máximas para el modelo SC8R-Web frente a las del modelo con elementos S4.

Tabla 3.3 Máximas tensiones en el modelo SC8R-Web.

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	18
Orientación	0°	45° y -45°	45°
Valor	3.127 GPa	1.537 GPa	3.332 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	3	13
Orientación	90°	90°	45°
Valor	0.1300 GPa	0.09596 GPa	0.1968 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	2	16
Orientación	45°	-45° y 45°	0°
Valor	-0.09798 GPa	-0.6677 GPa	0.1691 GPa

Comparando los resultados de dicha tabla con los de la tabla 3.2, se observa que en el modelo SC8R-Foot la máxima tensión en el foot stringer es mayor que en el modelo SC8R-Web, y viceversa para el web stringer. Esto es razonable ya que en el stiffener las tensiones máximas se tienen en la zona común entre el foot stringer y el web stringer, y recordando la asignación del laminado de los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web (figura 3.2), el modelado de la zona común entre el web stringer y el foot stringer se asocia al laminado del foot en el modelo SC8R-Foot, y se asocia al laminado del web en el modelo SC8R-Web. Sin embargo, sigue teniendo sentido comparar en qué láminas se alcanzan las máximas tensiones.

Así pues, en los modelos S4R, SC8R-Foot y SC8R-Web se alcanzan las máximas tensiones en las mismas láminas de la skin. En cuanto al foot stringer y el web stringer, las láminas donde se producen las máximas σ_{11} y σ_{22} en el foot stringer para el modelo SC8R-Web y el modelo S4R coinciden, mientras que el resto de láminas difieren entre sí, y entre el modelo SC8R-Foot y el modelo SC8R-Web solo coinciden en la máxima σ_{11} del foot stringer.

Dado que tal y como se comentó en el apartado 3.1 el modelo SC8R-Web es más realista que el modelo SC8R-Foot, se opta por presentar el campo tensional en algunas láminas en las que se obtienen tensiones máximas para el modelo SC8R-Web con el fin de conocer el campo tensional de dichas láminas y no con la intención de compararlas con las del modelo SC8R-Foot ya que es evidente que, sabiendo que los campos de deformaciones son prácticamente similares, el campo tensional será equivalente menos en la zona en la que se modela con laminados distintos.

En la figura 3.16 se muestra el campo tensional σ_{11} de la lámina nombrada como “RIGHTFOOTTOP” debido a que es la lámina del top de la parte derecha del foot stringer, que se adhiere también al web stringer. Se observa como el máximo de toda esa lámina está en el web stringer, siendo el máximo en el foot stringer el presentado en las tablas anteriores, que es inferior. Las tensiones σ_{11} son continuas entre el web stringer y el foot stringer debido a que los desplazamientos en la unión son iguales, por tanto también lo son las deformaciones y al ser toda la lámina a -45° el campo tensional es continuo.

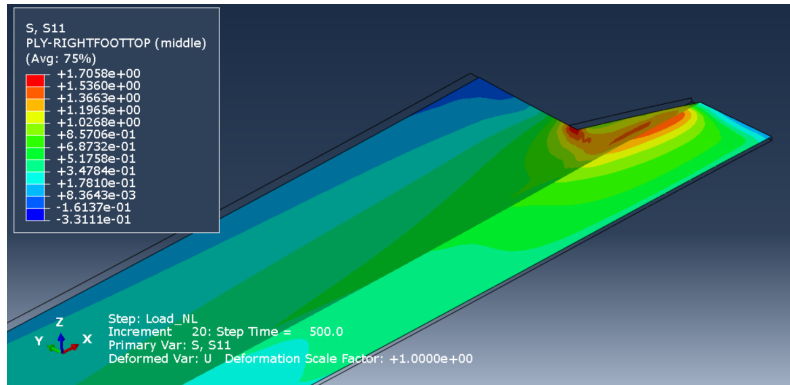


Figura 3.16 Campo de tensiones σ_{11} en la lámina superior de la parte asociada al foot stringer (lámina 5, a 45° en la parte izquierda del foot y a -45° la parte derecha) y del web stringer (lámina 30, a -45°) del modelo SC8R-Web.

Atendiendo a la figura 3.17 se observa como el máximo de la skin se encuentra en el extremo del runout, siendo las tensiones de las esquinas grandes por el hecho de ser puntos singulares.

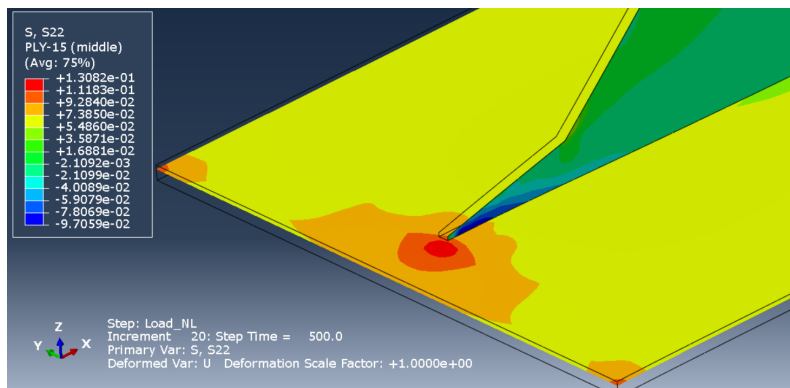


Figura 3.17 Campo de tensiones σ_{22} en la lámina 15 de la skin (90°) y del web stringer (0°) del modelo SC8R-Web.

Por último, en la figura 3.18 se muestra el campo tensional σ_{12} en la lámina 16 de la skin y del web stringer, siendo esta la lámina con mayor diferencia entre el modelo con continuum shell y con shell. Obteniendo el mapa tensional en esta misma zona para el modelo con elementos shell, se obtiene prácticamente la misma imagen (pero con distintos valores), por lo cuál las razones por las que se obtienen estos resultados tan distintos no parece ser evidente.

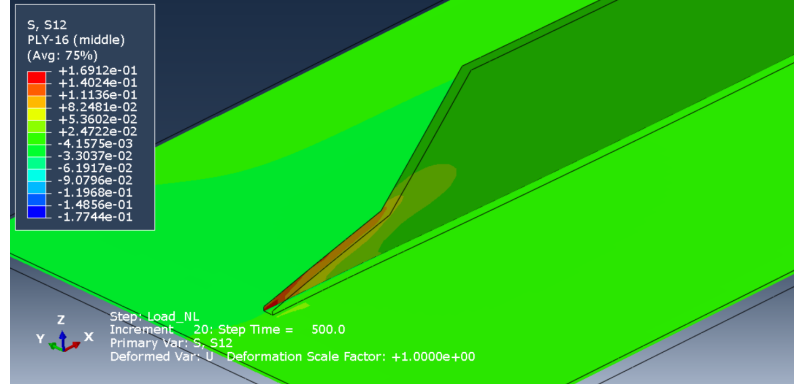


Figura 3.18 Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 16 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo SC8R-Web.

Una ventaja de los elementos SC8R frente a S4 y S4R es que ABAQUS obtiene un promedio de las tensiones σ_{zz} , σ_{xz} y σ_{yz} . Consultando la ayuda del software, este promedio se denota como $SSAVG_i$, siendo $i=1, \dots, 6$ y viene dado por:

$$SSAVG_i = SF_i/h \quad (3.1)$$

$$(SF1, SF2, SF3, SF4, SF5, SF6) = \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{33}) dz \quad (3.2)$$

Donde h es el espesor de la sección. Así, se procede a representar las magnitudes $SSAVG_4$, $SSAVG_5$ y $SSAVG_6$ del modelo SC8R-Foot y SC8R-Web para así tener una idea aproximada sobre los campos σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} respectivamente.

En la figura 3.19 se presenta la distribución de tensiones $SSAVG_6$ sobre la skin. Se observa que la zona de unión entre la skin y el foot stringer en el extremo del runout se tienen mayores tensiones promedio en el modelo SC8R-Web, y además se concluye que es un punto propenso a producirse delaminaciones. También destacar como en el extremo de la skin existen tensiones positivas debido a que al haber tracción en x se produce un acortamiento en y y en z por efecto Poisson, y el *MPC constraint* no permite dicho acortamiento.

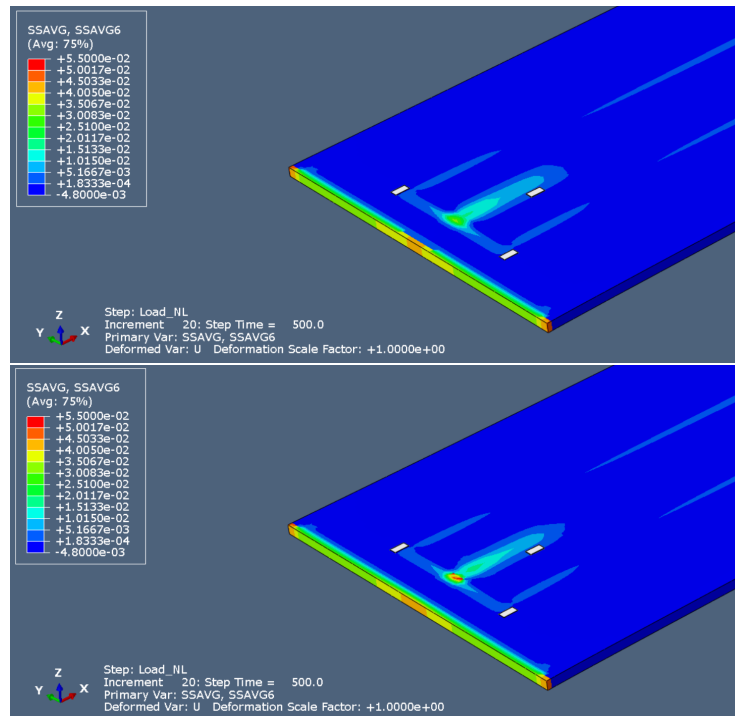


Figura 3.19 Campo de tensiones promedio $SSAVG_6$ en la skin del modelo SC8R-Foot (arriba) y del modelo SC8R-Web (abajo).

Por otro lado, en las figuras 3.20 y 3.21 se presentan las tensiones promedio asociadas a las tensiones σ_{13} y σ_{23} , respectivamente.

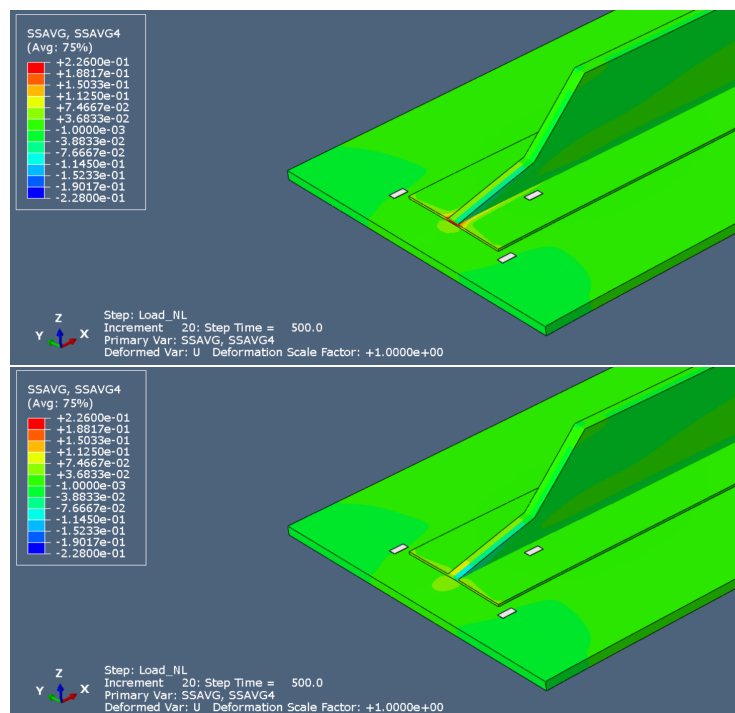


Figura 3.20 Campo de tensiones promedio $SSAVG_4$ en el modelo SC8R-Foot (arriba) y del modelo SC8R-Web (abajo).

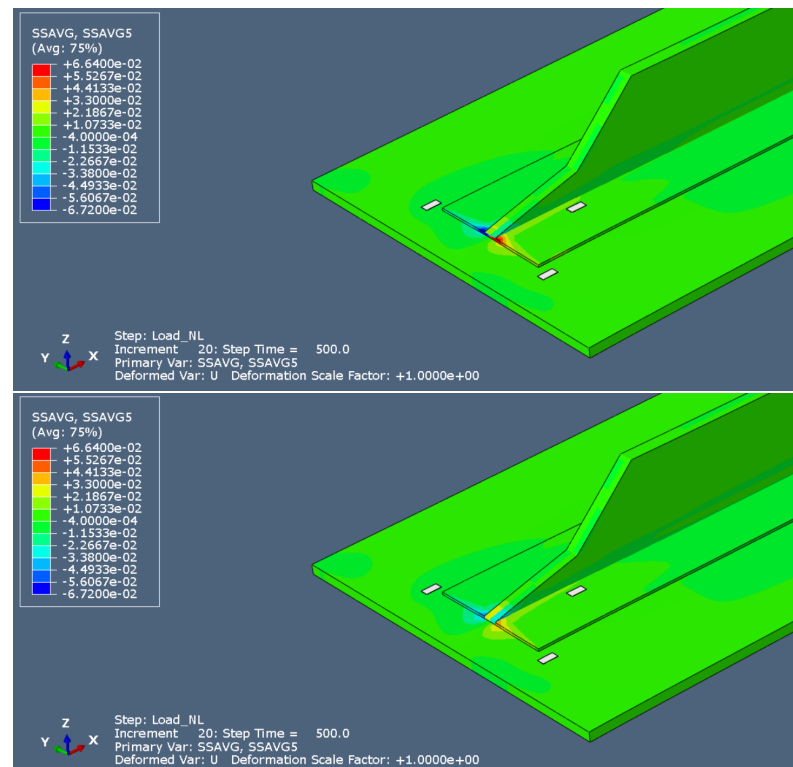


Figura 3.21 Campo de tensiones promedio $SSAVG_5$ en el modelo SC8R-Foot (arriba) y del modelo SC8R-Web (abajo).

Tras los resultados presentados en este apartado, se concluye que la estrategia para modelar la unión entre el foot stringer y el web stringer afecta a los resultados en tensiones máximas y en las tensiones promedio $SSAVG_4$, $SSAVG_5$ y $SSAVG_6$, siendo recomendable optar por el modelo SC8R-Web.

4 MODELOS CON CONTINUUM SOLID SHELL

En este capítulo se presentan las estrategias seguidas para modelar la probeta con los elementos continuum solid shell en ABAQUS (apartado 4.1) y se presentan los resultados de dichos modelos comparándolos con los resultados experimentales y los del modelo con elementos standard shell con integración completa (apartado 4.2).

4.1 Descripción de los modelos

Los modelos con CSS8 sólo difieren de los modelos con CS8R en la selección de los elementos que forman la malla y en la definición del composite layup.

En efecto, como es de esperar, en el módulo *Mesh* se eligen los elementos continuum solid shell en vez de los continuum shell para la skin y el stiffener. En cuanto a la creación de los *composite layups*, se debe elegir la opción de continuum solid shell.

El resto de operaciones en los módulos *Part*, *Mesh*, *Property*, *Assembly*, *Step*, *Interaction*, *Load* y *Job* son idénticos en ambos modelos. De hecho, para este TFG se han copiado los modelos SC8R-Foot y SC8R-Web y se han hecho las modificaciones mencionadas.

4.2 Resultados

Una vez descrita la elaboración de los modelos CSS8-Foot y CSS8-Web, se procede a comparar los resultados de dichos modelos con los resultados experimentales y con los del modelo con elementos shell con integración completa.

En el apartado 4.2.1 se presenta la deformada, el campo de desplazamientos y la curva carga desplazamiento, en el apartado 4.2.2 se presentan los campos de deformaciones en las láminas top y bottom de la probeta, así como las deformaciones en las bandas, y en el apartado 4.2.3 se muestran las tensiones máximas en el modelo incluyendo las tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} , los campos tensionales de algunas láminas donde se dan las tensiones máximas y por último se estudian las tensiones σ_{33} promedio.

Destacar que, de nuevo, en la representación de los resultados se harán referencia a los tres sistemas coordenados comentados al principio del capítulo 2 y representados en las figuras 2.1 y 2.2.

4.2.1 Desplazamientos

En primer lugar, en las figuras 4.1 y 4.2 se presentan respectivamente el campo de desplazamientos u_x y u_z sobre los modelos S4, CSS8-Foot y CSS8-Web en el sistema de referencia *Global*, estando la deformada

escalada con un factor de escala de 10 para visualizarla con claridad.

Observando ambas figuras se concluye que los campos de desplazamientos son prácticamente equivalentes para los 3 modelos, por tanto, no se tienen diferencias en los desplazamientos obtenidos en la probeta utilizando los elementos shell y los continuum solid shell, sin influir además como se modela la zona común del foot stringer y del web stringer.

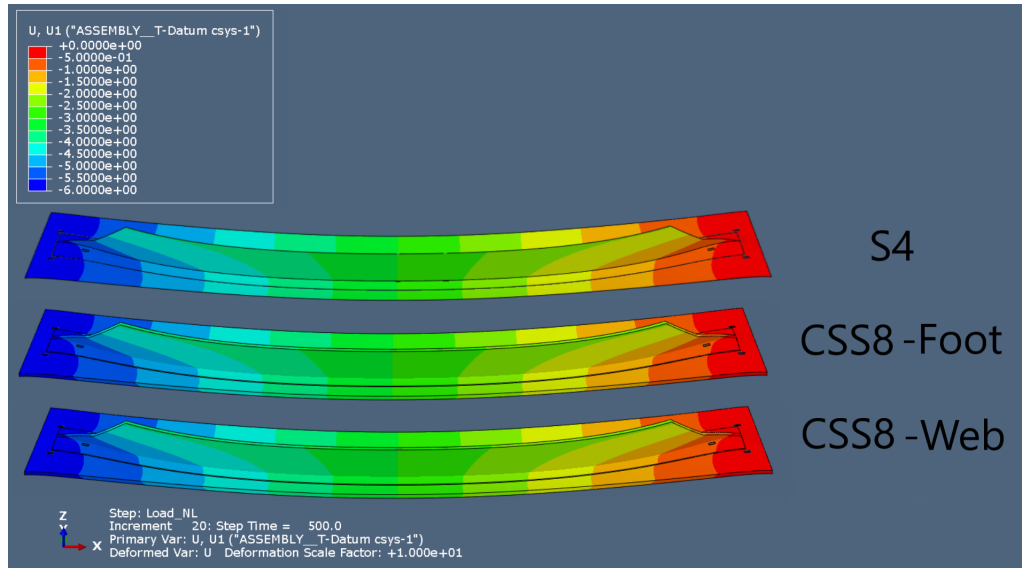


Figura 4.1 Desplazamientos u_x y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos CSS8.

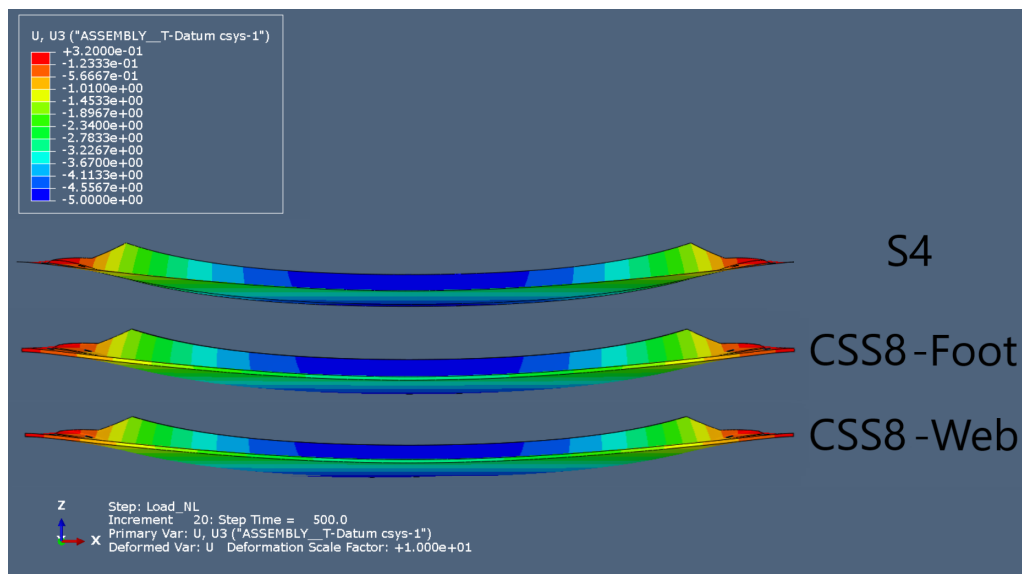


Figura 4.2 Desplazamientos u_z y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos CSS8.

Por otro lado, en la figura 4.3 se presenta el desplazamiento en el extremo de la probeta frente a la carga aplicada.

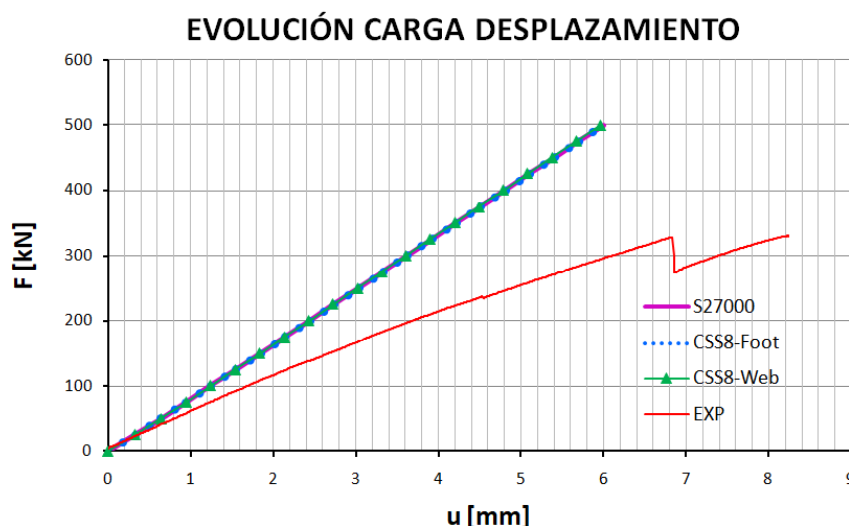


Figura 4.3 Comparación de la evolución carga desplazamiento para los modelos con continuum solid shell frente al modelo con elementos S4 y los resultados experimentales.

De las figuras 2.13, 3.6 y 4.3 se concluye que no hay prácticamente diferencia en la contribución de rigidez del modelo en función del tipo de elemento utilizado y de la estrategia de modelado de la zona común entre el foot stringer y el web stringer. Por tanto, el comportamiento global de los 6 modelos numéricos presentados en este documento es el mismo.

4.2.2 Deformaciones

A continuación se presentan las deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} sobre las láminas en el top y en el bottom de la probeta en los modelos S4, SC8R-Foot y SC8R-Web.

En concreto, el campo de deformaciones ϵ_{xx} se presenta en la figura 4.4 para las láminas del top y en la figura 4.5 para las láminas del bottom. Se sigue el mismo esquema para las deformaciones ϵ_{yy} presentadas en las figuras 4.6 y 4.7, y para las deformaciones ϵ_{xy} presentadas en las figuras 4.8 y 4.9.

En las figuras mencionadas en el párrafo anterior se observa que si bien los resultados son levemente distintos al caso de standard shell, la variación es despreciable. En cuanto a la evolución del campo de deformaciones, al ser resultados parecidos los comentarios del capítulo 2 son de nuevo de aplicación.

Como conclusión, se tiene que no hay diferencias significativas entre los 6 modelos numéricos utilizados a la hora de estudiar las deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} en la probeta, siendo cualquiera de ellos válido para ese fin. La excepción a esto son las deformaciones en la zona de unión del foot stringer y del web stringer, donde se recomienda usar la estrategia CSS8-Web al ser más realista como se comentó en el capítulo 1 y 3.

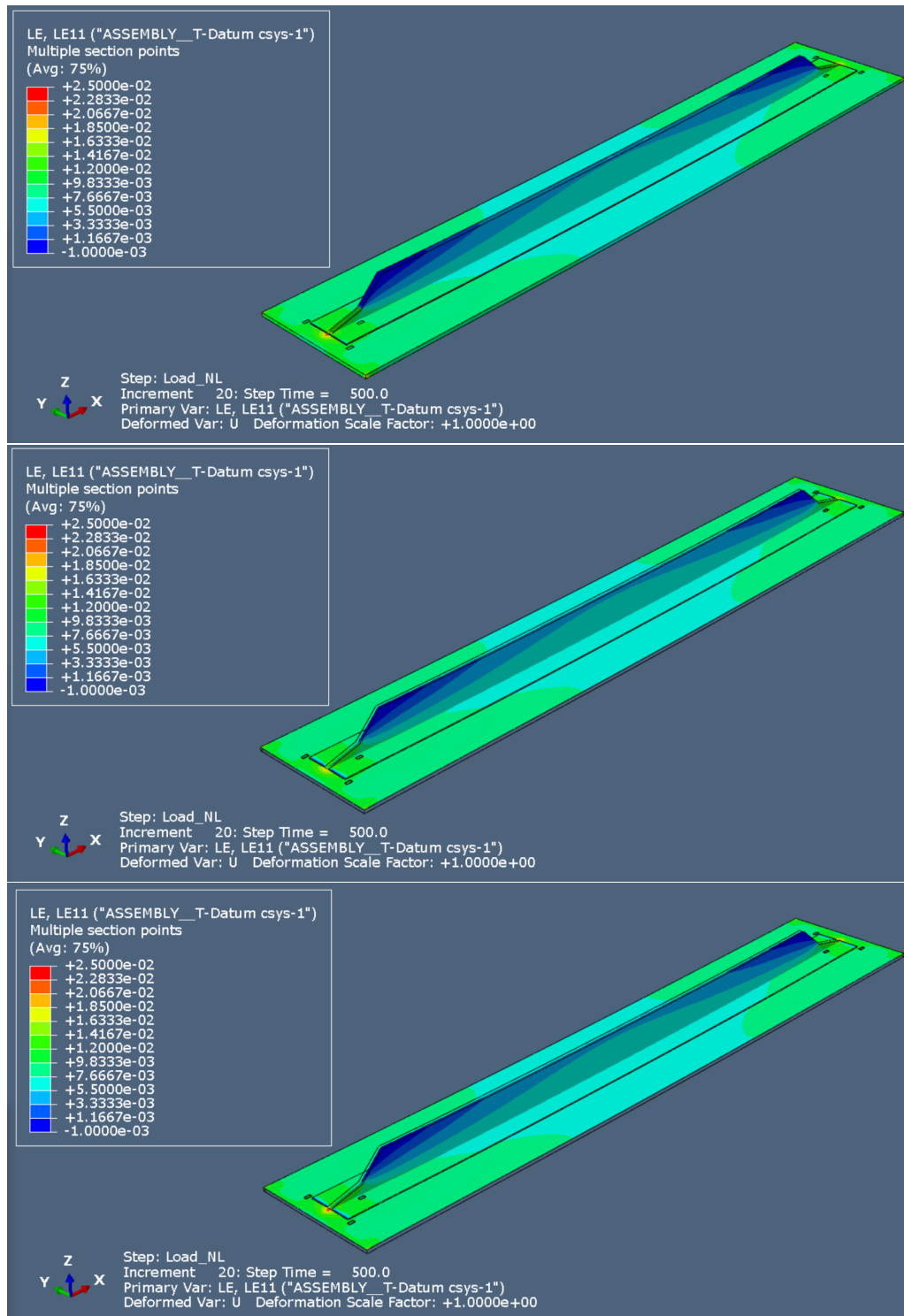


Figura 4.4 Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo).

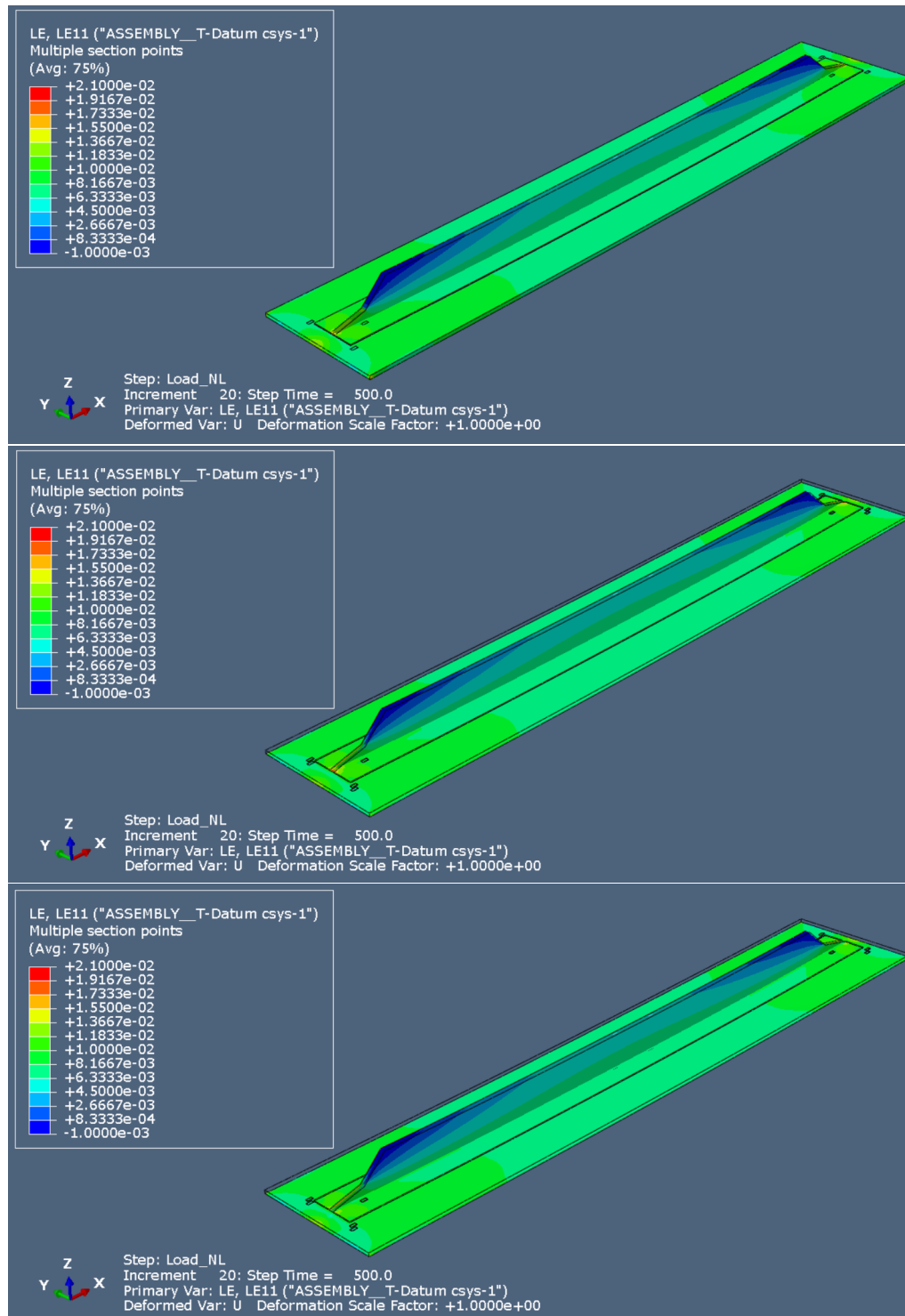


Figura 4.5 Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo).

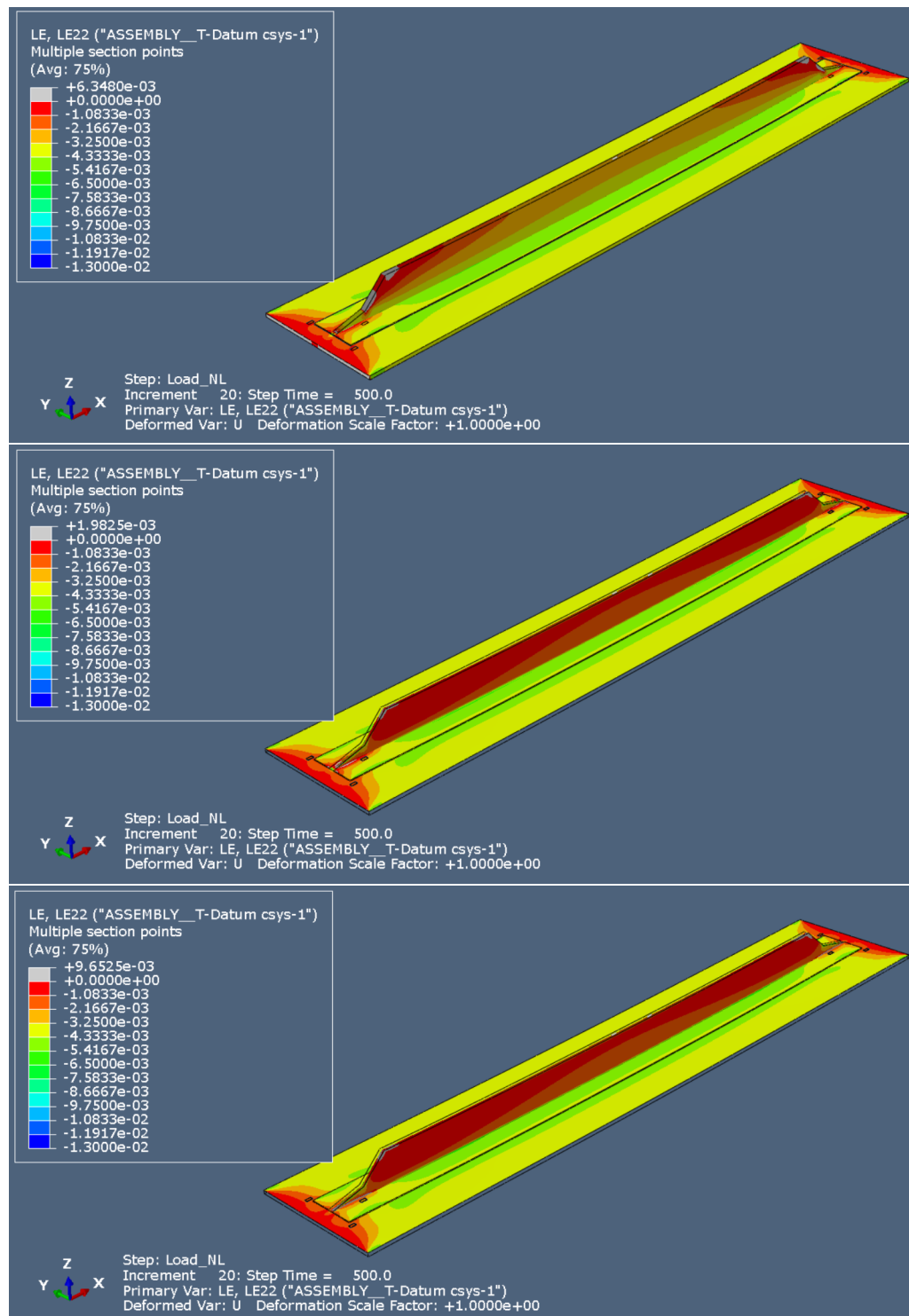


Figura 4.6 Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo).

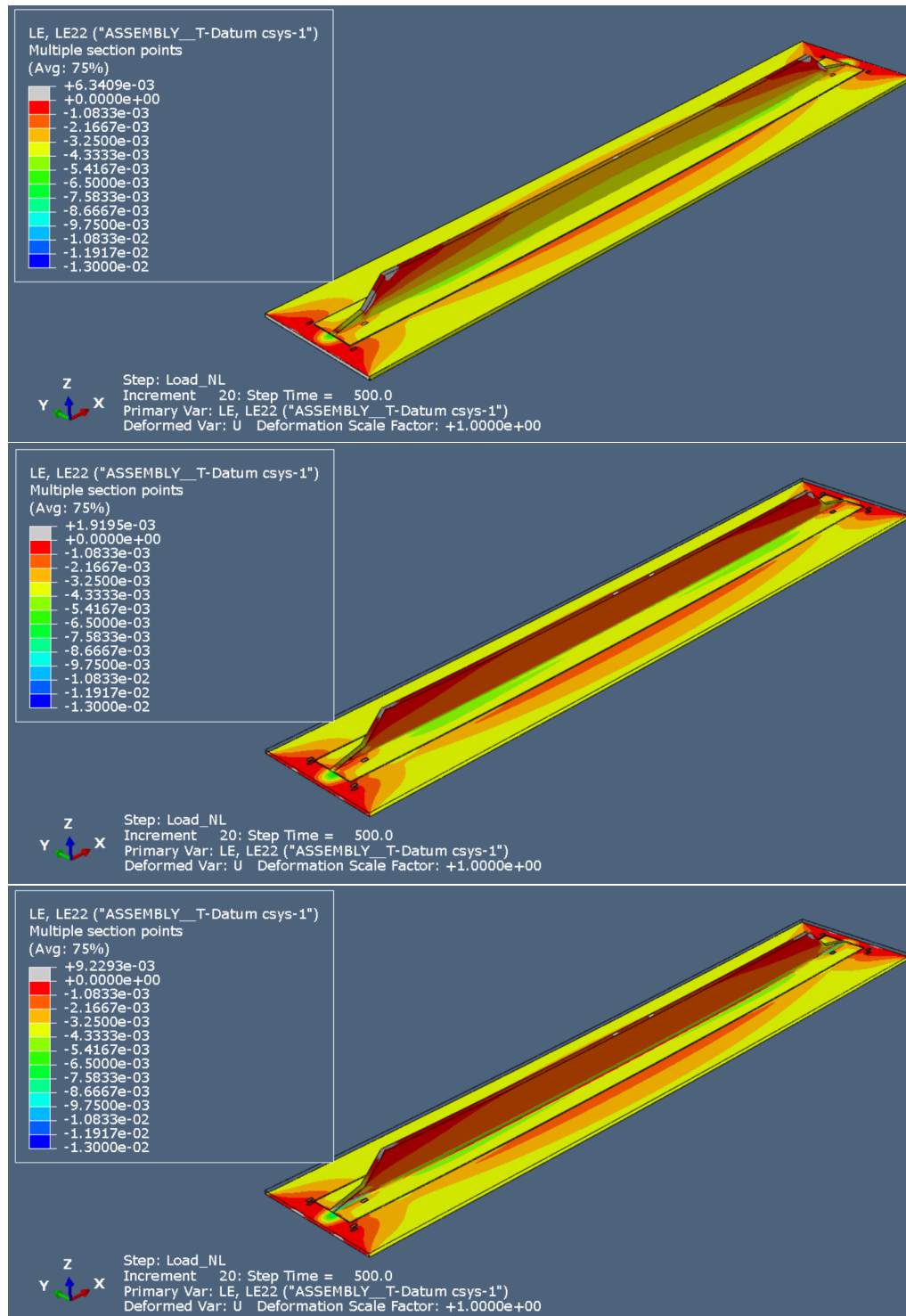


Figura 4.7 Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo).

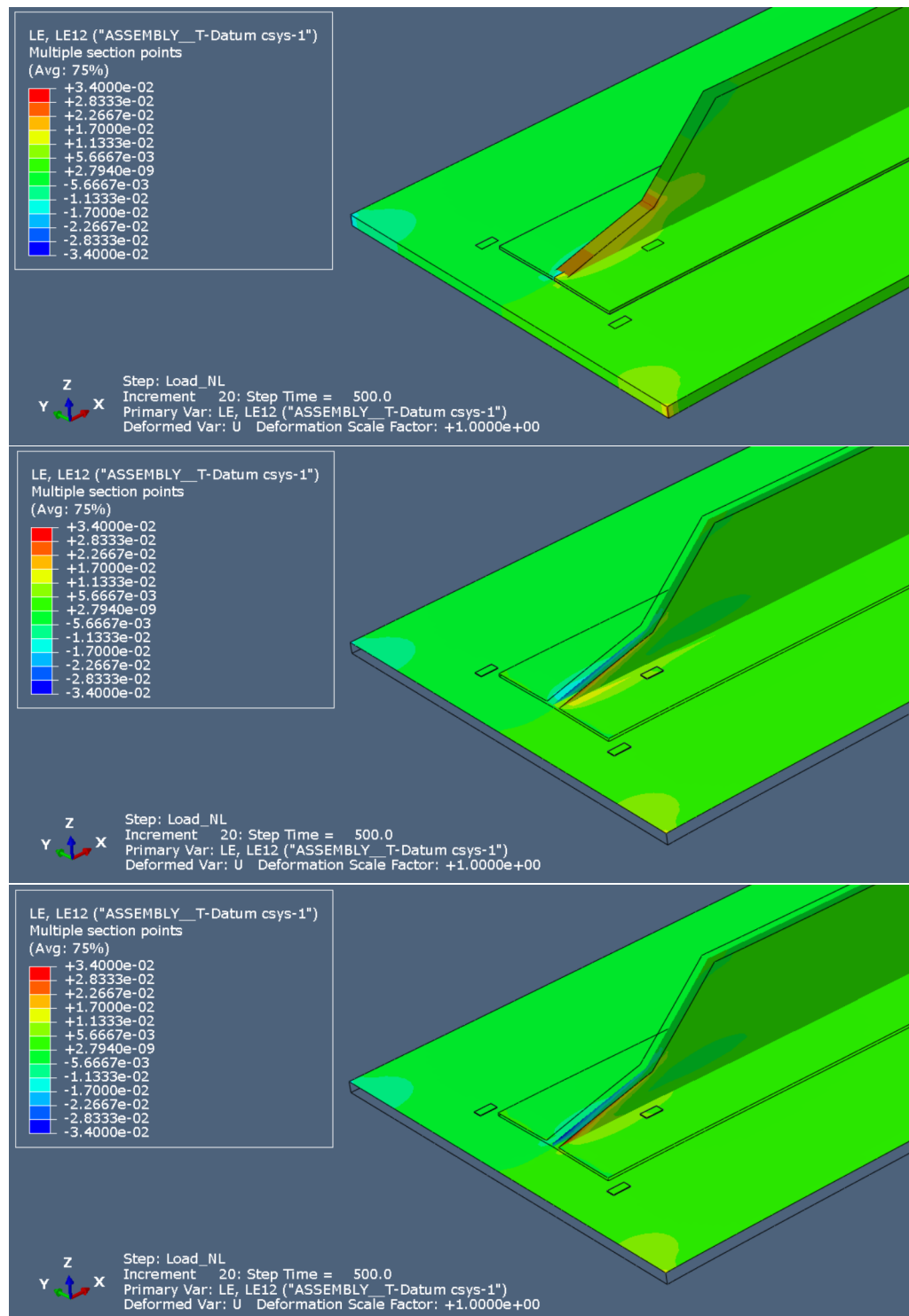


Figura 4.8 Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo).

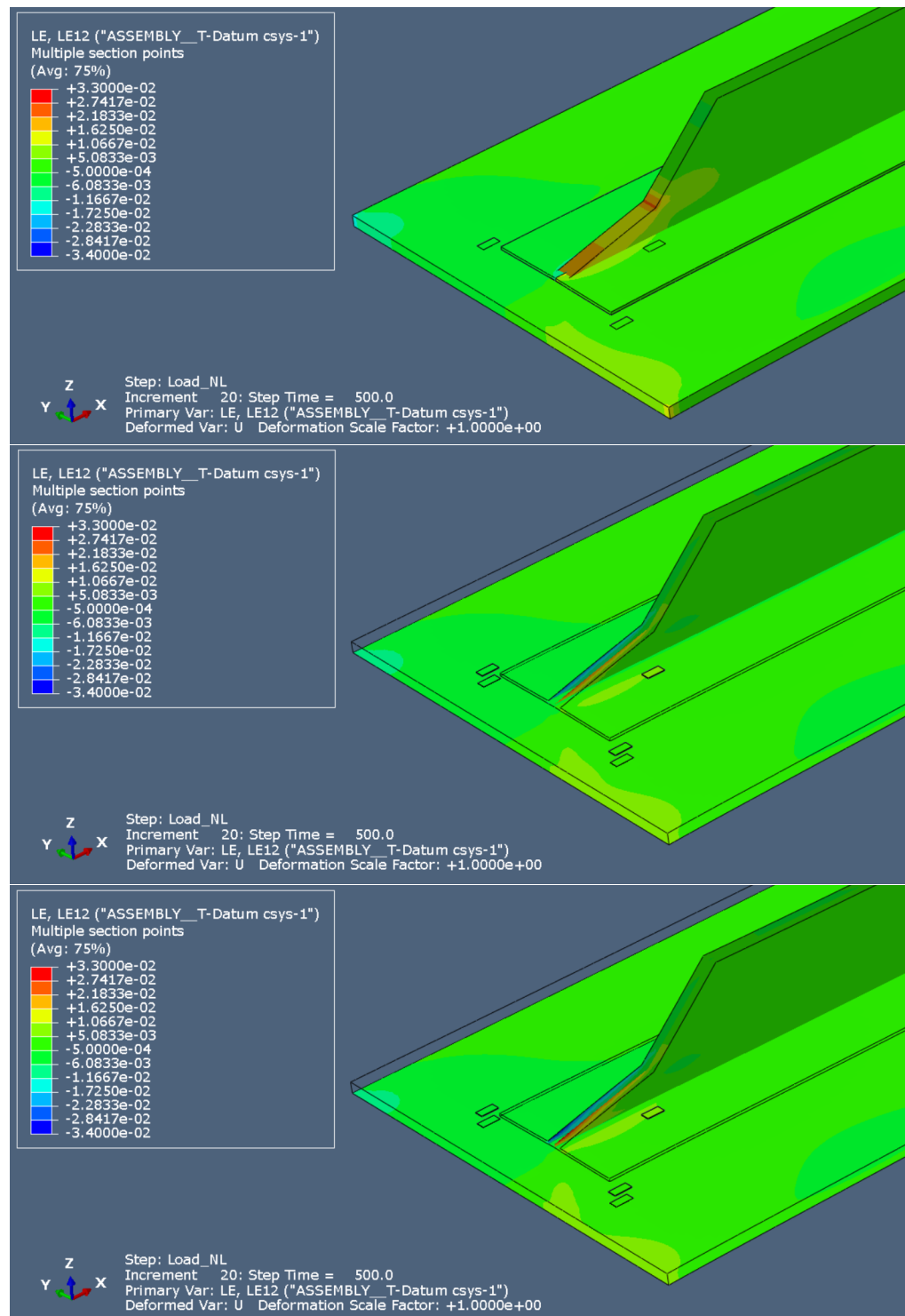


Figura 4.9 Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo).

Una de las principales ventajas de los elementos CSS8 frente a los S4, S4R y SC8R es que permiten obtener resultados tridimensionales como pueden ser las tensiones σ_{zz} , σ_{xz} y σ_{yz} , que son fundamentales en ciertos estudios con materiales compuestos como el estudio de delaminaciones, y las deformaciones ϵ_{zz} , ϵ_{xz} y ϵ_{yz} , para conocer por ejemplo las deformaciones en la dirección del espesor debidas al efecto Poisson.

Siguiendo con el esquema de este apartado, se presenta el campo de deformaciones ϵ_{zz} en la figura 4.10

para las láminas del top y en la figura 4.11 para las láminas del bottom, siguiéndose el mismo procedimiento para las deformaciones ε_{xz} presentadas en las figuras 4.12 y 4.13, y para las deformaciones ε_{yz} presentadas en las figuras 4.14 y 4.15.

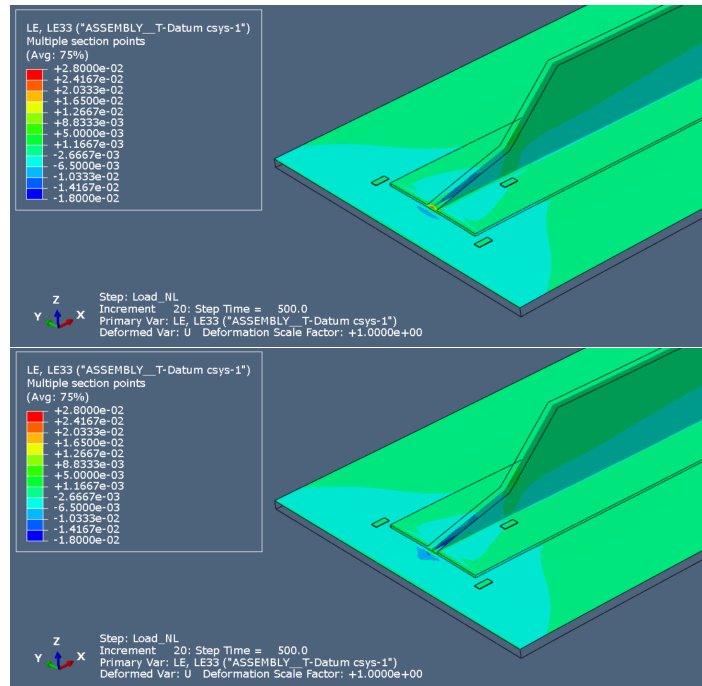


Figura 4.10 Campo de deformaciones ε_{zz} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo).

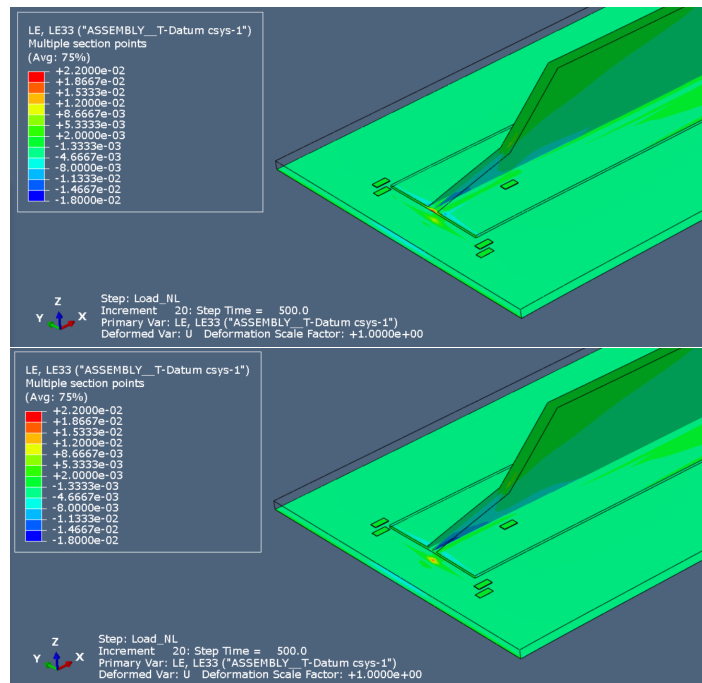


Figura 4.11 Campo de deformaciones ε_{zz} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo).

En las figuras 4.10 y 4.11 se observa que se tienen deformaciones $\varepsilon_{zz} < 0$ en la skin y en el foot stringer debido al efecto Poisson. Además, comparando una figura con la otra se observa que las deformaciones ε_{zz} en el top son mayores que en el bottom.

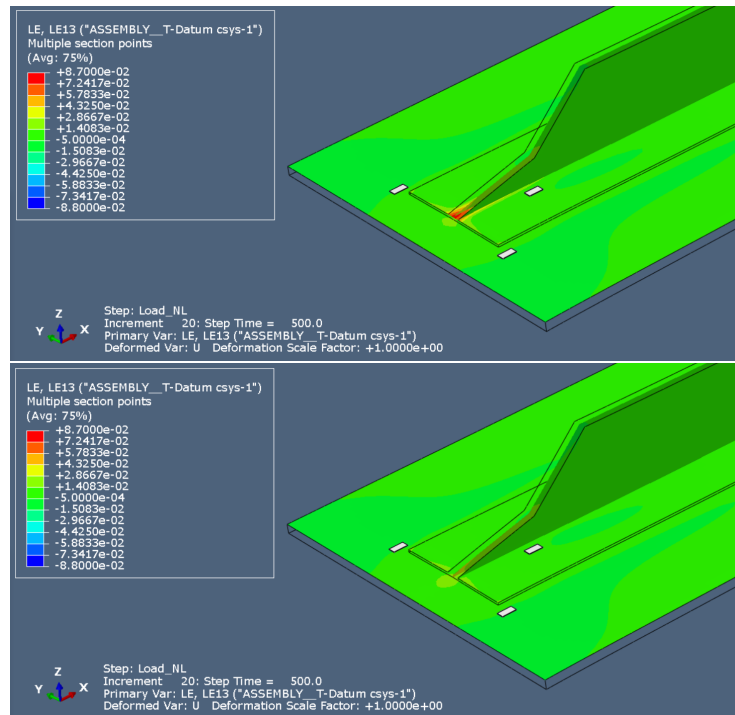


Figura 4.12 Campo de deformaciones ε_{xz} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo).

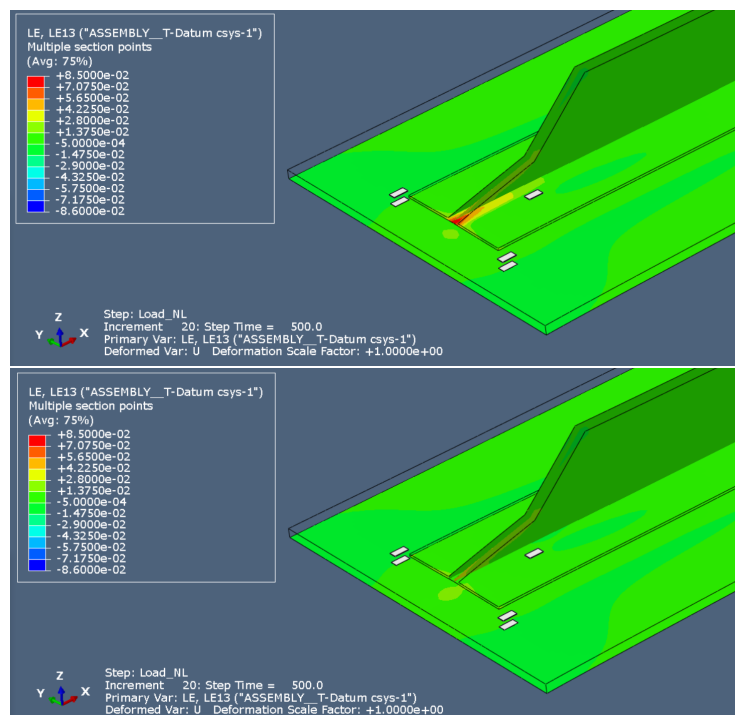


Figura 4.13 Campo de deformaciones ε_{xz} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo).

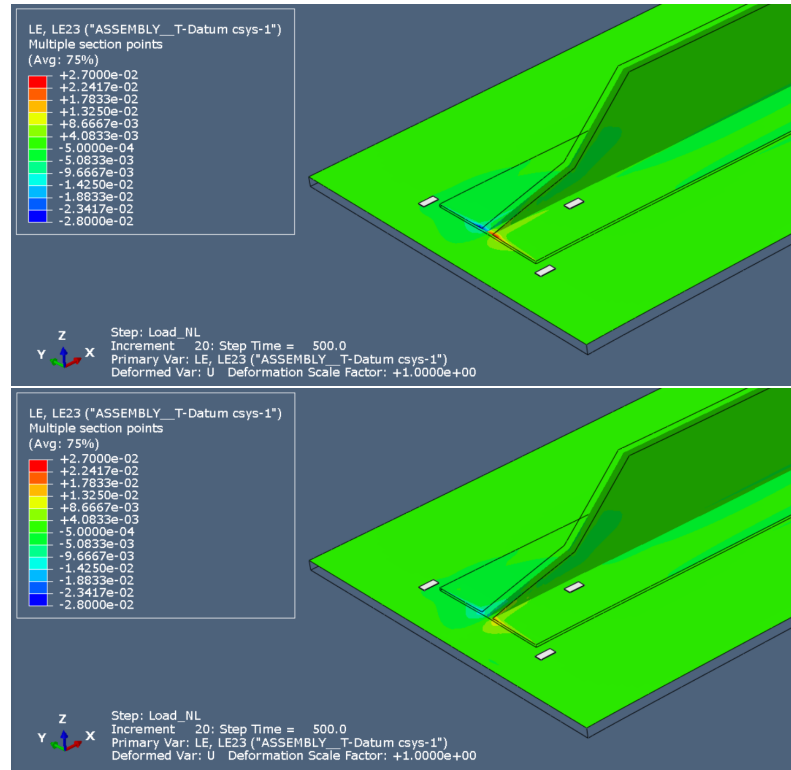


Figura 4.14 Campo de deformaciones ε_{yz} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo).

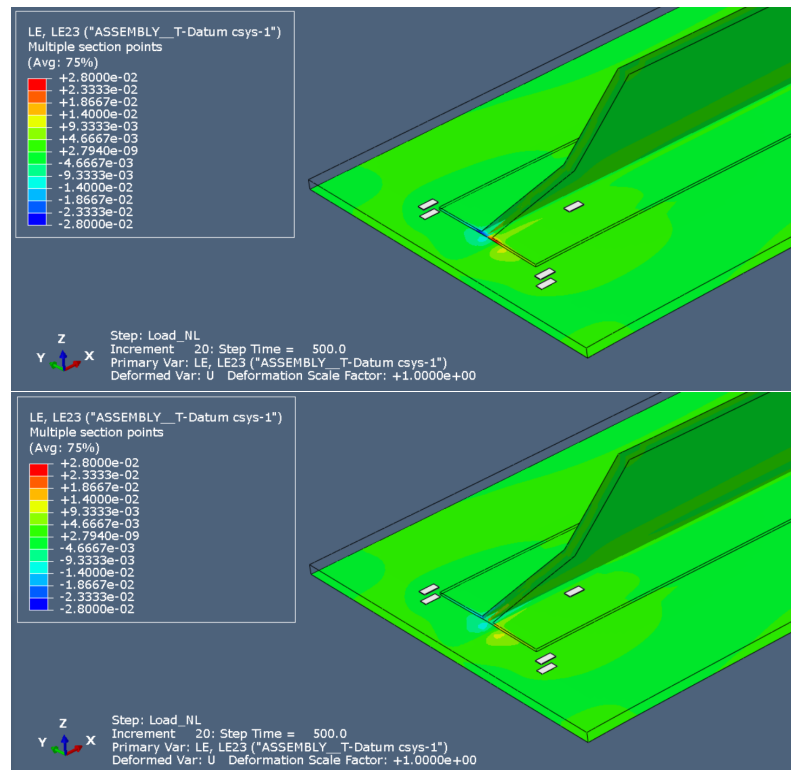


Figura 4.15 Campo de deformaciones ε_{yz} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo).

Con respecto a los campos de deformación ϵ_{zz} , ϵ_{xz} y ϵ_{yz} , se tienen unos resultados parecidos obviando la zona de unión del foot stringer y del web stringer, ya que ahí simplemente se presentan resultados en distintas superficies.

Por otro lado, se presentan las deformaciones en las bandas extensométricas de los modelos CSS8-Foot y CSS8-Web obtenidas en el centroide del elemento, comparándose a su vez con las del modelo S4 y con los resultados experimentales. Se sigue el mismo esquema al seguido en la sección 3.2.2.

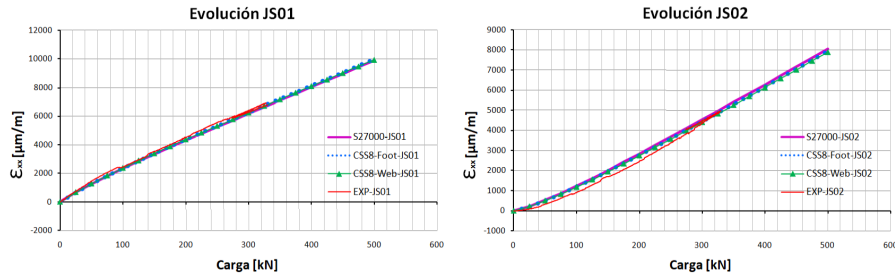


Figura 4.16 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS01 y JS02 de los modelos con continuum solid shell y del modelo S4.

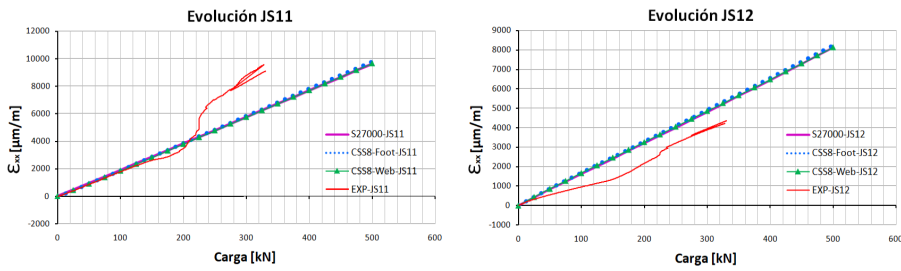


Figura 4.17 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS11 y JS12 de los modelos con continuum solid shell y del modelo S4.

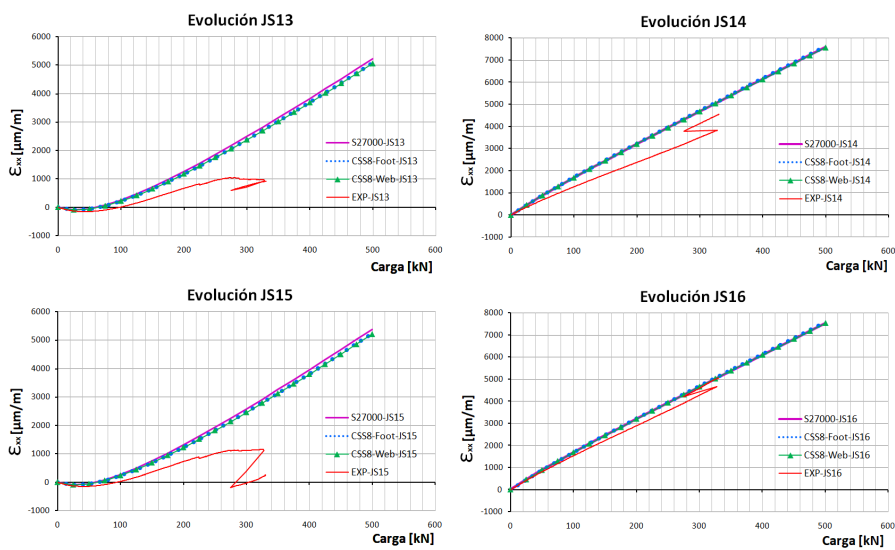


Figura 4.18 Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS13, JS14, JS15 y JS16 de los modelos con continuum solid shell y del modelo S4.

Se concluye finalmente que los modelos CSS8-Foot, CSS8-Web, SC8R-Foot y SC8R-Web proporcionan deformaciones similares en todas las bandas, y que estos a su vez proporcionan deformaciones casi idénticas a los modelos S4 y S4R, ajustándose razonablemente a las medidas experimentales.

4.2.3 Tensiones

A continuación se presentan para los modelos CSS8-Foot y CSS8-Web las máximas tensiones en la skin, en el foot stringer y en el web stringer, así como las láminas donde estas se producen, obteniendo dichos resultados empleando el sistema de coordenadas *Default*. Al igual que se hizo en el apartado 3.2.3, se repiten las tablas de los resultados del modelo S4 para mayor facilidad en la lectura del documento.

Comparando las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se observa que en los modelos S4, CSS8-Foot y CSS8-Web se alcanzan las máximas tensiones en las mismas láminas de la skin. En cuanto al foot stringer y el web stringer, las láminas donde se producen las máximas σ_{11} y σ_{22} en el foot stringer para el modelo CSS8-Foot y el modelo S4 coinciden, mientras que el resto de láminas difieren entre sí, y entre el modelo CSS8-Foot y el modelo CSS8-Web solo coinciden en la máxima σ_{11} del foot stringer.

Tabla 4.1 Máximas tensiones en el modelo con elementos S4 (2º vez).

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	1
Orientación	0°	45° y -45°	-45°
Valor	3.411 GPa	2.148 GPa	2.775 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	3	2
Orientación	90°	90°	45°
Valor	0.1387 GPa	0.1270 GPa	0.1330 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	5	3
Orientación	45°	45° y -45°	90°
Valor	-0.1144 GPa	0.1013 GPa	0.09644 GPa

Tabla 4.2 Máximas tensiones σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} en el modelo CSS8-Foot.

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	13
Orientación	0°	45° y -45°	45°
Valor	3.479 GPa	1.922 GPa	2.878 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	3	18
Orientación	90°	90°	0°
Valor	0.1492 GPa	0.167 GPa	0.1560 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	1	18
Orientación	45°	45° y -45°	45°
Valor	-0.0341 GPa	0.0785 GPa	0.0395 GPa

Tabla 4.3 Máximas tensiones σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} en el modelo CSS8-Web.

Máxima σ_{11}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	19	5	26
Orientación	0°	45° y -45°	-45°
Valor	2.768 GPa	1.554 GPa	2.878 GPa

Máxima σ_{22}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	15	1	18
Orientación	90°	45° y -45°	0°
Valor	0.1682 GPa	0.1094 GPa	0.3248 GPa

Máxima σ_{12}			
	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
Lámina	20	1	15
Orientación	45°	45° y -45°	0°
Valor	-0.1066 GPa	0.07061 GPa	0.1990 GPa

Teniendo en cuenta que los elementos CSS8 también pueden calcular las tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} del modelo, en las tablas 4.4 y 4.5 se presentan el máximo de dichas tensiones en cada parte del modelo. De dichas tablas se observa que la orientación de la lámina donde se obtiene la tensión máxima es equivalente en casi todos los casos menos en la máxima σ_{23} del foot stringer, y que los máximos valores se dan en la zona de unión entre el foot stringer y en el web stringer, ya que los máximos en el foot stringer para el modelo CSS8-Foot son mayores que los máximos en el modelo CSS8-Web, y viceversa para el caso del web stringer. Además, mencionar que los máximos se producen en las mismas láminas para el caso de las tensiones σ_{13} y σ_{23} en la skin y en el web stringer.

Tabla 4.4 Máximas tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} en el modelo CSS8-Foot.

Modelo CSS8-Foot: Máxima σ_{13}			
Lámina	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
	2	2	16
Orientación	0°	-45° y +45°	0°
Valor	0.0756 GPa	0.294 GPa	0.111 GPa

Modelo CSS8-Foot: Máxima σ_{23}			
Lámina	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
	6	3	3
Orientación	90°	90°	90°
Valor	0.0549 GPa	0.254 GPa	0.0820 GPa

Modelo CSS8-Foot: Máxima σ_{33}			
Lámina	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
	19	4	22
Orientación	0°	-45° y +45°	-45°
Valor	0.102 GPa	0.297 GPa	0.0460 GPa

Tabla 4.5 Máximas tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} en el modelo CSS8-Web.

Modelo CSS8-Web: Máxima σ_{13}			
Lámina	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
	2	4	16
Orientación	0°	-45° y +45°	0°
Valor	-0.0341 GPa	0.117 GPa	0.135 GPa

Modelo CSS8-Web: Máxima σ_{23}			
Lámina	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
	6	5	3
Orientación	90°	45° y -45°	90°
Valor	-0.0842 GPa	0.0859 GPa	0.0996 GPa

Modelo CSS8-Web: Máxima σ_{33}			
Lámina	Skin	Foot Stringer	Web Stringer
	2	5	2
Orientación	0°	45° y -45°	45°
Valor	0.156 GPa	0.107 GPa	0.0978 GPa

Tras comparar las tensiones máximas de los dos modelos con elementos CSS8, teniendo en cuenta que el modelo CSS8-Web es más realista que el modelo CSS8-Foot se opta por presentar el campo tensional en algunas láminas en las que se obtienen tensiones máximas para el modelo CSS8-Web con el fin de conocer el campo tensional de dichas láminas y no con la intención de compararlas con las del modelo CSS8-Foot.

Así pues, en las figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24 se presentan el campo tensional en las láminas en las que se obtienen las máximas tensiones σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} en todo el modelo, respectivamente.

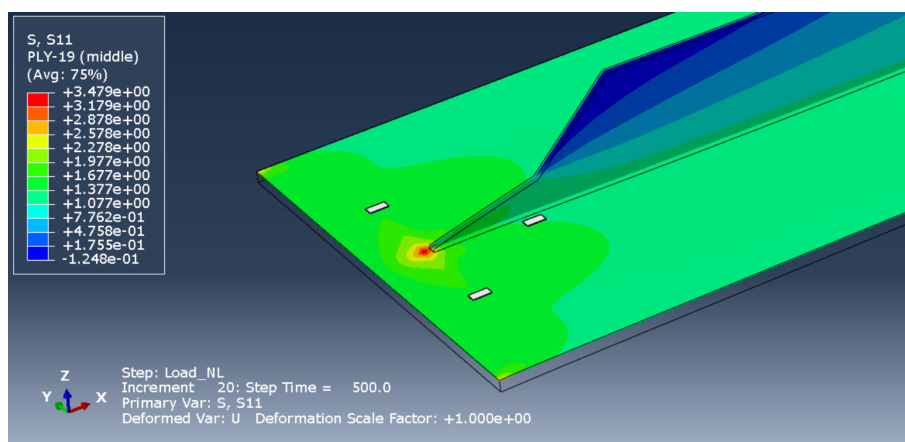


Figura 4.19 Campo de tensiones σ_{11} en la lámina 19 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo CSS8-Web.

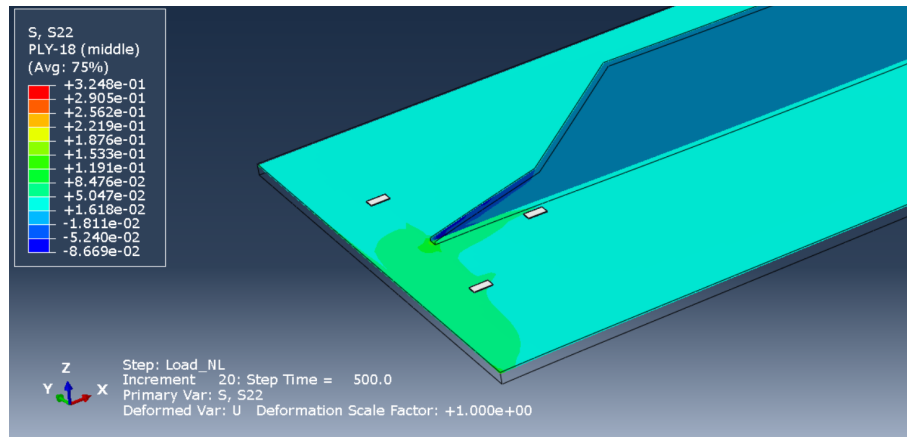


Figura 4.20 Campo de tensiones σ_{22} en la lámina 18 de la skin (-45°) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web.

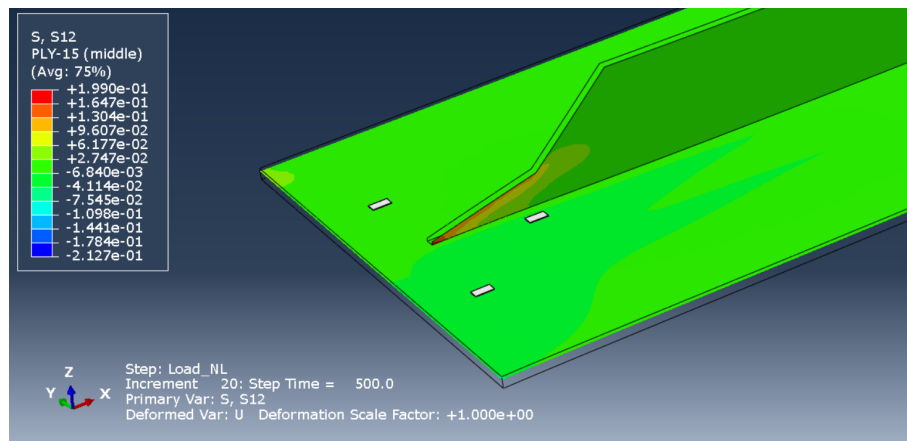


Figura 4.21 Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 15 de la skin (90°) y del web stringer (0°) del modelo CSS8-Web.

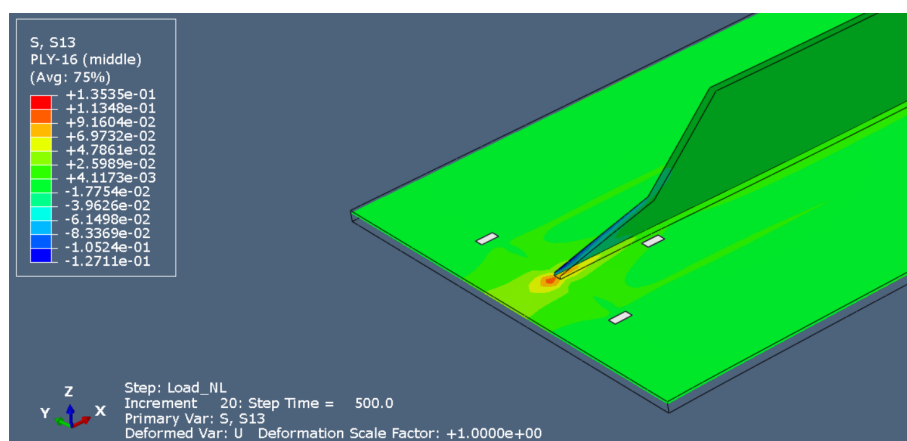


Figura 4.22 Campo de tensiones σ_{13} en la lámina 16 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo CSS8-Web.

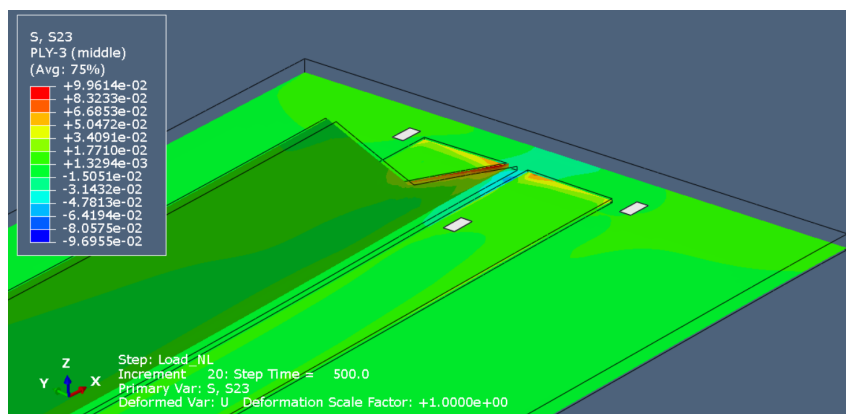


Figura 4.23 Campo de tensiones σ_{23} en la lámina 3 de la skin (-45°), del foot stringer (90°) y del web stringer (90°) del modelo CSS8-Web.

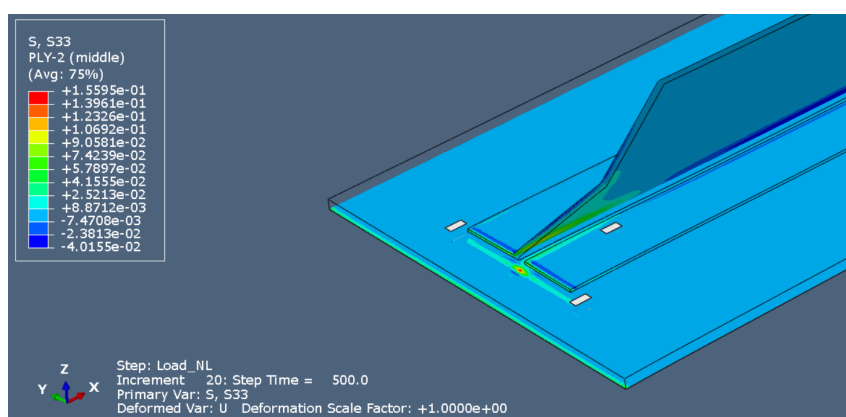


Figura 4.24 Campo de tensiones σ_{33} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web.

Teniendo en cuenta la figura 4.24 y las tensiones máximas σ_{33} de la tabla 4.5 se concluye que la zona de la skin que está debajo del extremo final del runout y la zona del web stringer situada en el runout son zonas donde puede haber delaminaciones.

Por otro lado, aprovechando que en el capítulo 3 se presentan las tensiones promedio $SSAVG_i$ de las continuum shell, siendo $i = 1, \dots, 6$, se procede a comparar dichas tensiones promedio con las tensiones promedio obtenidas con los elementos CSS8.

Dado que ABAQUS no proporciona directamente las $SSAVG_n$ para el modelo con elementos CSS8, se va a calcular la tensión promedio en elementos concretos del modelo, para así comparar en distintas zonas de manera precisa los resultados de cada modelo.

Al ser un proceso laborioso, solo se realiza la comparación para 3 elementos, que teniendo en cuenta la figura 1.15 será el elemento situado justo debajo de la banda JS03, el situado justo debajo de la banda JS05 y el situado en medio del web stringer, en la posición (x,y) de la banda JS15, y dado que la tensión más crítica para las delaminaciones es la σ_{33} , la comparación se centra en las $SSAVG_6$.

El procedimiento seguido es seleccionar los elementos elegidos y obtener su $SSAVG_6$ para el modelo SC8R-Web, y seleccionar dichos elementos en el modelo CSS8-Web, obtener la evolución de las tensiones a lo largo del espesor, calcular la media de estas tensiones y compararla con la $SSAVG_6$ obtenida para el modelo SC8R-Web.

Así pues, en la figura 4.25 se representa la evolución de las tensiones σ_{33} en la skin a lo largo su espesor.

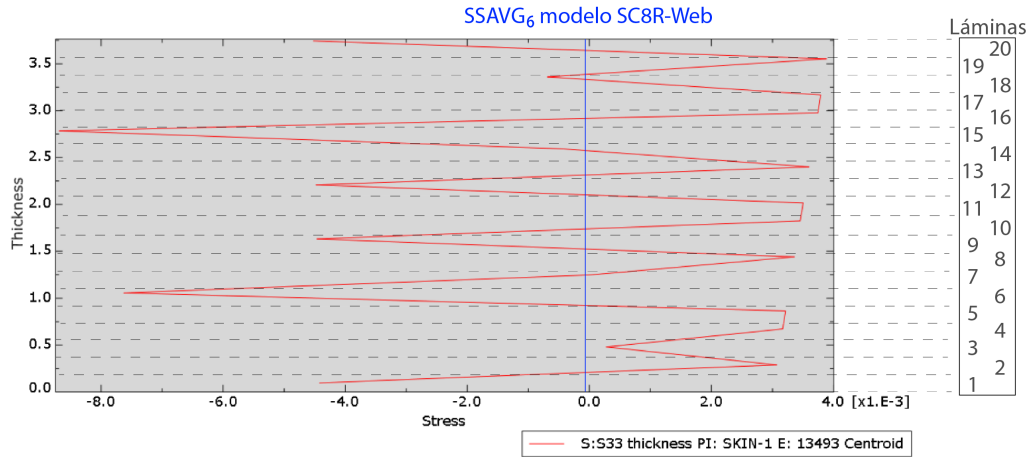


Figura 4.25 En rojo, evolución de las tensiones σ_{33} a lo largo del espesor en el elemento debajo de la banda JS03 para el modelo CSS8-Web, y en azul el promedio de las tensiones σ_{33} en el modelo SC8R-Web.

Mencionar que los cambios bruscos de pendiente en las tensiones σ_{33} se produce debido al cambio en la orientación de las láminas, y cada pico se corresponde con una de las 20 láminas de la skin. De esta gráfica también se deduce cuáles son las láminas más susceptibles a delaminaciones debido a su alto valor de σ_{33} , que en el caso de la skin sería en las láminas 16, 17 y 19.

Tras obtener la evolución de las tensiones de la figura 4.25, se realizan los cálculos mencionados y se obtiene la siguiente tabla:

	SSAVG₆ del modelo SC8R-Web	Media de σ_{33} del modelo CSS8-Web
Debado de JS03	-26.1628E-06 GPa	-11.938E-06 GPa
Debajo de JS05	-125.098E-06 GPa	-48.002E-06 GPa
En (x,y) de JS15	10.2635E-06 GPa	7.3189E-06 GPa

Se puede observar que en todo caso las tensiones SSAVG₆ son mayores a la media obtenida con el modelo continuum solid shell, pero se obtiene un resultado del mismo orden en las tensiones promedio.

A continuación se procede a representar las tensiones σ_{33} , σ_{13} y σ_{23} para el modelo con elementos CSS8-Web, comparándose con los campos asociados a las magnitudes SSAVG₆, SSAVG₄ y SSAVG₅ del modelo con elementos SC8R, respectivamente. En esta comparación solo se tendrá en cuenta la evolución del campo tensional y no los valores con el fin de saber si en el caso de la probeta modelada los campos tensionales σ_{33} , σ_{13} y σ_{23} tienen una estructura similar a las tensiones promedio SSAVG₆, SSAVG₄ y SSAVG₅. Se elige representar las tensiones en la lámina 2 pero podría haberse elegido cualquier otra, siendo lo recomendable una lámina entre la lámina 1 y la 5 para presentar resultados en el foot stringer.

En la figura 4.26 se representan las tensiones σ_{33} en la lámina 2 de la skin del modelo CSS8-Web.

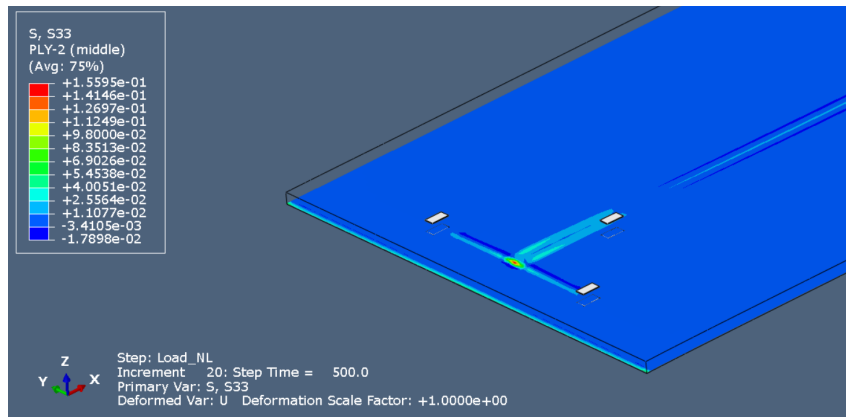


Figura 4.26 Campo de tensiones σ_{33} en la lámina 2 de la skin (0°) del modelo CSS8-Web.

Contrastando la distribución con la figura 3.19 donde se presentan las $SSAVG_6$ y centrándose en la evolución del modelo SC8R-Web se observa que se obtiene una distribución similar.

Por último, en las figuras 4.27 y 4.28 se muestran los campos tensionales σ_{xz} y σ_{yz} en el top de la probeta.

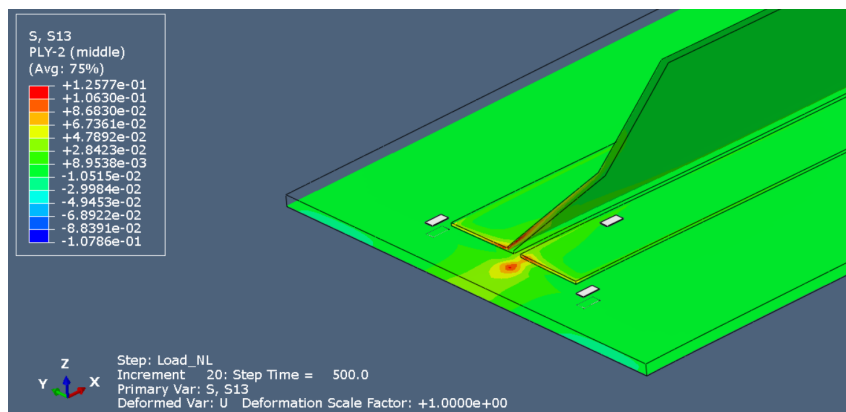


Figura 4.27 Campo de tensiones σ_{xz} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web.

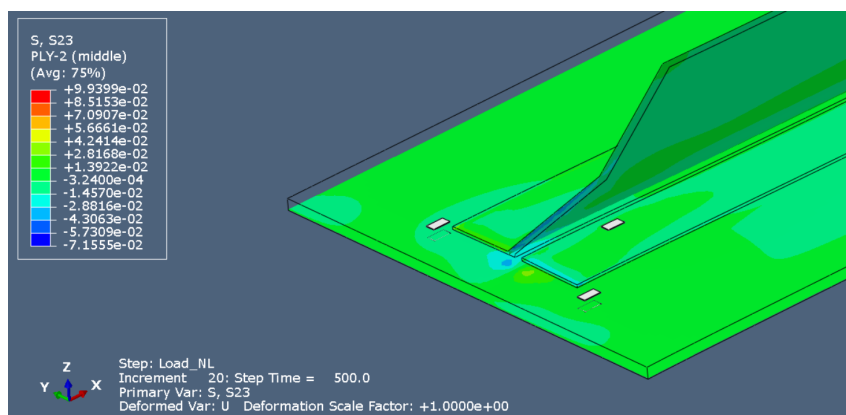


Figura 4.28 Campo de tensiones σ_{yz} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web.

Mientras que en la figura 4.27 se tiene una distribución similar a la de la figura 3.20, en la figura 4.28 no se observan parecidos destacables con la figura 3.21.

Finalmente se concluye que podría ser útil visualizar las tensiones promedio $SSAVG_4$, $SSAVG_5$ y $SSAVG_6$ para visualizar la evolución de esas tensiones de manera global en la pieza o al menos encontrar zonas donde se producen máximos o mínimos, pero teniendo en cuenta que en general los valores $SSAVG_n$ no son del mismo orden que las tensiones en cada lámina.

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO

En este capítulo se realiza un resumen de los objetivos alcanzados (apartado 5.1), se desarrollan diversas conclusiones sobre el estudio realizado (apartado 5.2) y se exponen posibles desarrollos futuros derivados del mismo (apartado 5.3).

5.1 Resumen

La resolución de los 6 modelos numéricos presentados en este documento empleando el software ABAQUS permite comparar distintas estrategias y enfoques para la resolución de un mismo problema, consistente en una probeta de runout fabricada con material compuesto sobre la que se aplica tracción en sus extremos. Además, gracias a que los resultados han sido corroborados con resultados experimentales se puede reflexionar sobre las posibilidades, ventajas e inconvenientes de los elementos shell, continuum shell y continuum solid shell sabiendo que los resultados de los modelos son razonables.

5.2 Conclusiones

A continuación se hace un resumen de las conclusiones obtenidas sobre los tres elementos empleados, conocimiento producto de la elaboración de los modelos en ABAQUS y de la visualización y análisis de los resultados expuestos en este documento.

5.2.1 Conclusiones sobre el modelado

Mientras que en el modelo con elementos S4 y S4R durante el modelado hay que decidir donde situar la posición de la superficie de referencia de la shell y qué asignación de pares de superficie maestra-esclava elegir para poder realizar correctamente las tie constraints, al tener en cuenta el espesor en los modelos con elementos SC8R y CSS8 surgen problemas para resolver uniones entre láminas con distintas normales, además de que también hay que elegir la combinación adecuada de superficies maestra-esclava.

Teniendo esto en cuenta, en el caso de la probeta modelada los elementos S4 y S4R son más simples de utilizar, y los elementos SC8R y CSS8 necesitan mayor tiempo de análisis previo a la elaboración de los modelos y cierta toma de decisiones, mostrando que tienen más posibilidades de modelado. En efecto, elegir los elementos SC8R y CSS8 lleva a tomar la decisión de modelar el rigidizador como una sola pieza, la denominada “stiffener”, y ello trae consigo mayor dificultad en la definición de la malla y la posibilidad de elección de dos estrategias distintas (figura 3.2), y el hecho de que el laminado del foot en la parte izquierda y derecha sean distintos en la parte izquierda y derecha hace necesario dividir el web stringer en parte izquierda y derecha.

Otro aspecto a considerar entre los shell, los continuum shell y los continuum solid shell es la asignación de la orientación del elemento. Mientras que en los shell esta orientación se define de manera automática

como consecuencia de la definición de la geometría de las parts, para los continuum shell y los continuum solid shell es necesario definirlas, y es muy recomendable revisar las orientaciones al hacer modificaciones sobre el mallado o la geometría para asegurarse de que el comportamiento como lámina del elemento está correctamente descrito.

Por otro lado, en cuanto a la facilidad para cambiar de un elemento a otro, una vez definido un modelo con elementos S4, cambiar a otro con elementos S4R es inmediato porque los modelos son idénticos salvo por el tipo de elemento, pero para cambiar de S4 o S4R a elementos SC8R y CSS8 es necesario definir un modelo nuevo. Por su parte, para cambiar entre elementos SC8R y CSS8 sólo es necesario redefinir algunos aspectos del modelo: los composites layups y la orientación del material y de los elementos.

Por último, destacar las diferencias asociadas a definir las bandas extensométricas para el caso de los shell, para los continuum shell y para los continuum solid shell. Mientras que en los shell las bandas se definen con elementos shell y deben de situarse por dentro de los shell a analizar, teniendo en cuenta la posición de la superficie de referencia, para los otros dos tipos de elementos no hay más que definir una membrana y realizar un *embedded element* entre la *instance* y la membrana.

5.2.2 Conclusiones sobre los resultados

En primer lugar, en la tabla 5.1 se presenta una comparativa con el espacio en disco necesario para guardar los resultados para los modelos desarrollados con los distintos elementos, y el CPU Time empleado en resolver cada problema, tanto para el caso en el que se tienen los *outputs request* por defecto de ABAQUS como en el caso en el que se añade para cada modelo los *outputs request* necesarios para obtener los resultados mostrados en la memoria. No se especifica la diferencia entre las dos estrategias para los modelos SC8R y CSS8 ya que los resultados son prácticamente idénticos.

Tabla 5.1 Resumen resultados costes computacionales.

	S4	S4R	SC8R	CSS8
Almacenamiento en memoria con resultados por defecto	0.255 GB	0.0975 GB	0.154 GB	0.418 GB
CPU Time por defecto	518.90 seg	196.90 seg	328.30 seg	2085.10 seg
Almacenamiento en memoria con los outputs presentados en el TFG	3.68 GB	0.96 GB	1.08GB	1.76 GB
CPU Time con outputs	603.30 seg	227.90 seg	342.40 seg	2133.3 seg

Se observa que ampliar los *outputs request* en el problema resuelto en esta memoria dispara el espacio en disco necesario, y aumenta el CPU Time pero en mucha menor medida que el aumento asociado al espacio en disco.

Destacar también el bajo coste temporal de los modelos con continuum shell, ya que este se resuelve con integración reducida. Sin embargo, se obtiene mayor cantidad de información que los S4 y los S4R gracias a las magnitudes $SSAVG_n$, sin ser necesario resolver un modelo continuum solid shell que tiene un CPU time más de 6 veces mayor.

En cuanto al efecto de los elementos shell, continuum shell y continuum solid shell sobre los resultados de las tensiones, deformaciones y desplazamientos hay varios aspectos a comentar:

- El comportamiento global de los 6 modelos numéricos definidos es muy parecido. Esto se refleja en el campo de desplazamientos, en las curvas de desplazamiento en función de la carga y en la representación de las deformaciones de las bandas extensométricas.
- Los campos de deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} son prácticamente similares para todas las láminas en todos los modelos analizados. Por tanto, cualquier modelo es útil para obtener cualitativamente dichos campos. La excepción a esto se da al estudiarse la zona común entre el foot stringer y el web stringer en los elementos SC8R y CSS8, ya que al tenerse dos estrategias que modelan la zona de unión del foot stringer y del web stringer de manera distinta se tienen distintos resultados. Se recomienda la estrategia “-Web” al ser más realista.

- Los continuum shell son capaces de obtener en el espesor un promedio de las tensiones σ_{33} , σ_{13} y σ_{23} , resultados que pueden ser útiles para dar una primera aproximación de la evolución de dichos campos tensionales.
- Los continuum solid shell son capaces de obtener las tensiones σ_{i3} y las deformaciones ϵ_{i3} en cada lámina, y se tienen unos resultados parecidos en cuanto a la evolución de dichos campos en los modelos CSS8-Foot y CSS8-Web. Se recomienda el modelo CSS8-Web para estudiar la zona común del foot stringer y del web stringer.
- Lo más relevante en cuanto a las láminas en las que se producen las tensiones máximas y los valores de dichas tensiones es que las láminas para los modelos con elementos S4 y S4R coinciden, y que los valores máximos para el caso del elemento S4R son mayores que los del elemento S4 si se obtienen las tensiones en los puntos de integración, y si se obtienen en el centroide las diferencias son del orden del 0.1%-0.2%.

Por otra parte, mencionar que la obtención de los resultados de las bandas extensométricas es mucho más intuitivo a la hora de definir las bandas con elementos del tipo membrana (es decir, para los modelos con elementos SC8R y CSS8) que con elementos del tipo shell (necesario para los modelos con elementos S4 y S4R), ya que en el primer caso se obtiene el resultado en la zona de unión entre el modelo y la banda, mientras que en el segundo caso hay que discernir, caso de que en el shell de la banda se definan 5 section points, si el resultado obtenido es el asociado a la section point 1 (bottom) o a la section point 5 (top).

Por último, como conclusión general del proyecto, si bien es cierto que los elementos shell son más rápidos de definir y usando la integración reducida se obtienen resultados rápidos y con bajos requisitos de memoria, este elemento se encuentra muy limitado en cuanto a resultados y posibilidades de modelado. Por su parte, los elementos continuum shell y continuum solid shell tienen gran versatilidad en su aplicación¹, y es posible permutar entre uno y otro de manera rápida.

Por tanto, caso de que no se esté interesado en obtener las tensiones σ_{i3} como en el caso de los materiales metálicos, donde dichas tensiones suelen ser despreciables, entonces parece que lo más recomendable es modelar el problema utilizando standard shell con integración reducida. De hecho, cambiando las tie constraints por bonded interfaces, que son uniones que a nivel de usuario se definen de manera similar a las tie constraints, se podría obtener con cualquier elemento las tensiones en las intercaras de las uniones, por ejemplo en la unión entre el stiffener y la skin, permitiendo estudiar fenómenos como el despegue.

Sin embargo, si interesa obtener las tensiones σ_{i3} y las deformaciones ϵ_{i3} , como en el caso de los materiales compuestos al ser las tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} importantes aunque sean pequeñas porque son las responsables de la aparición de delaminaciones y despegues, entonces lo más adecuado sería comenzar resolviendo el modelo con elementos SC8R aprovechando que esos modelos se resuelven con bajo *CPU Time*, permitiendo conseguir resultados rápidos (que además incluyen información preliminar sobre las tensiones σ_{33} , σ_{13} y σ_{23}) y hacer la transición a elementos CSS8 si es necesario una vez verificados los resultados con los elementos SC8R, permitiendo además reducir enormemente los costes temporales asociados al proceso iterativo relacionado con la detección de errores en el modelo numérico.

5.3 Desarrollos futuros

Dada la amplitud y el interés del tema, hay gran cantidad de posibles análisis futuros que surgen en relación al presente trabajo.

Por un lado, como continuación natural del presentado, sería interesante elaborar un modelo de elementos finitos sólidos (no shell) con varios elementos en cada lámina de los laminados con el objetivo de que sirva de referencia para comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos en cada elemento.

También sería interesante plantear y resolver un problema con giros grandes, como podría ser un problema de inestabilidad por pandeo, para así comprobar si existen diferencias en las deformaciones en las bandas en

¹ «Choosing a shell element», ayuda de ABAQUS 2019 Artículo

función del elemento.

Otra propuesta de desarrollo podría ser modelar el daño para intentar justificar la discrepancia entre los modelos numéricos y los resultados experimentales, más concretamente, encontrar por qué difieren algunas deformaciones experimentales de las bandas con los modelos numéricos resueltos a partir de unos 100 KN.

Por otro lado, sería interesante desarrollar un nuevo elemento sólido para solventar los casos en los que existe interferencia entre el laminado de dos orientaciones, como ha ocurrido en la zona común del foot stringer y del web stringer.

También sería conveniente desde un punto de vista experimental cambiar la forma de medir el desplazamiento en los ensayos de tracción para conseguir una rigidez de la probeta más exacta, como podría ser realizando las medidas justo al final de la mordaza y no empleando el cabezal de la máquina de ensayo .

Índice de Figuras

1.1	Estructura reticular para formar el fuselaje y el estabilizador vertical del Piper PA-18. Fuente: https://sky4buy.com/Piper-PA-18-150-Super-Cub-Fuselage-PA-11292339446638/013066 obtenida el 09/08/2020	1
1.2	Esquema de avión con fuselaje monocasco reforzado, fuente: obtenida el 09/08/2020 en https://docplayer.es/40121961-Area-estructuras-y-materiales.html	2
1.3	Interior del fuselaje de un B787, fuente: dominio público	2
1.4	Perfil rigidizador en L	2
1.5	Perfil rigidizador en T	2
1.6	Esquema de un larguerillo en forma de T con runout que está adherido a una placa, fuente: artículo en https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382230100006X	3
1.7	Integración completa	4
1.8	Integración reducida	4
1.9	Ejemplo de estado de flexión pura ante un momento aplicado M_3	4
1.10	Deformación en el punto de integración de un elemento con integración reducida ante las cargas equivalentes de la flexión pura (situación indeformada en negro, y situación deformada en azul)	5
1.11	Deformación en los puntos de integración de un elemento con integración completa ante las cargas equivalentes de la flexión pura (situación indeformada en negro, situación deformada en azul)	5
1.12	Estructura básica de un standard shell	6
1.13	Estructura básica de un continuum shell con 8 nodos, y de un continuum solid shell	7
1.14	Vista en perspectiva de la probeta modelada en ABAQUS	8
1.15	Vista en planta con dimensiones de la probeta	8
1.16	Vista de perfil con dimensiones de la probeta	9
1.17	Esquema de la sección de un stiffener real	10
1.18	Esquema de una lámina con la misma orientación de las fibras en la parte derecha y en la izquierda de la web	10
2.1	Ejemplo de representación en el sistema <i>ASSEMBLY__TDatum csys-1</i> donde se observa la dirección de los ejes x, y, z en las 3 partes fundamentales del modelo: skin, foot stringer y web stringer	11
2.2	Ejemplo de representación en el sistema <i>Default</i> donde se observa para la lámina 2 (ver tabla 1.3) la dirección de los ejes 1,2,3 en la skin (fibras a 0°), en la parte derecha del foot stringer (fibras a $+45^\circ$) y en el web stringer (fibras a $+45^\circ$)	12
2.3	Vista en el módulo <i>Interaction</i> del modelo con elementos shell	13
2.4	Convergencia de la malla de la banda JS01	15
2.5	Convergencia de la malla de la banda JS02	15
2.6	Convergencia de la malla de la banda JS11	15
2.7	Convergencia de la malla de la banda JS12	15
2.8	Convergencia de la malla de la banda JS15	15
2.9	Evolución del tiempo de computación en función del número de elementos de la malla	16
2.10	Desplazamientos u_x y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y elementos S4R	17
2.11	Desplazamientos u_z y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y elementos S4R	17

2.12	Vista de perfil de la probeta (vista en plano xz), donde se observa en negro la configuración indeformada de la probeta y su línea de centro de gravedad a una distancia d de la piel, y en azul la skin y la posición de la línea de centro de gravedad en una situación deformada genérica del ensayo	18
2.13	Curva carga desplazamiento de los modelos shell frente a los resultados experimentales	18
2.14	Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo)	19
2.15	Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo)	19
2.16	Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo)	20
2.17	Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo)	20
2.18	Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo)	21
2.19	Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba) y S4R (abajo)	21
2.20	Deformaciones ϵ_{xx} de la bandas de la parte derecha de la probeta (considerando figura 1.15)	22
2.21	Deformaciones ϵ_{xx} de la bandas de la parte izquierda de la probeta (considerando figura 1.15)	23
2.22	Deformaciones ϵ_{xx} de la bandas de la parte central de la probeta (considerando figura 1.15)	24
2.23	Campo de tensiones σ_{11} en la lámina 19 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo con elementos S4	26
2.24	Campo de tensiones σ_{11} en la lámina 5 del foot stringer (45° izquierda y -45° derecha) del modelo con elementos S4	26
2.25	Campo de tensiones σ_{22} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo con elementos S4	27
2.26	Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 5 del foot stringer (45° izquierda y -45° derecha) del modelo con elementos S4	27
2.27	Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 3 del web stringer (90°) del modelo con elementos S4	27
3.1	Orientación de los elementos en la skin (izquierda) y en el stiffener (derecha) para los modelos con elementos SC8R, donde el color marrón denota la superficie positiva	29
3.2	Esquema de las dos estrategias seguidas para el modelado de la probeta con elementos SC8R, donde se muestra los laminados para cada zona del stiffener y la dirección de apilado	30
3.3	Vista en el módulo <i>Interaction</i> del modelo SC8R-Web	31
3.4	Desplazamientos u_x y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos SC8R	32
3.5	Desplazamientos u_z y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos SC8R	32
3.6	Comparación de la evolución carga desplazamiento para los modelos con continuum shell frente al modelo con elementos S4 y los resultados experimentales	33
3.7	Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo)	34
3.8	Campo de deformaciones ϵ_{xx} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo)	35
3.9	Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo)	36
3.10	Campo de deformaciones ϵ_{yy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo)	37
3.11	Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo)	38
3.12	Campo de deformaciones ϵ_{xy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo SC8R-Foot (centro) y del modelo SC8R-Web (abajo)	39
3.13	Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS01 y JS02 de los modelos con continuum shell y del modelo S4	40
3.14	Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS11 y JS12 de los modelos con continuum shell y del modelo S4	40
3.15	Deformaciones ϵ_{xx} de las bandas JS13, JS14, JS15 y JS16 de los modelos con continuum shell y del modelo S4	41

3.16	Campo de tensiones σ_{11} en la lámina superior de la parte asociada al foot stringer (lámina 5, a 45° en la parte izquierda del foot y a -45° la parte derecha) y del web stringer (lámina 30, a -45°) del modelo SC8R-Web	43
3.17	Campo de tensiones σ_{22} en la lámina 15 de la skin (90°) y del web stringer (0°) del modelo SC8R-Web	43
3.18	Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 16 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo SC8R-Web	44
3.19	Campo de tensiones promedio $SSAVG_6$ en la skin del modelo SC8R-Foot (arriba) y del modelo SC8R-Web (abajo)	45
3.20	Campo de tensiones promedio $SSAVG_4$ en el modelo SC8R-Foot (arriba) y del modelo SC8R-Web (abajo)	45
3.21	Campo de tensiones promedio $SSAVG_5$ en el modelo SC8R-Foot (arriba) y del modelo SC8R-Web (abajo)	46
4.1	Desplazamientos u_x y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos CSS8	48
4.2	Desplazamientos u_z y deformada con factor de escala 10 del modelo con elementos S4 y de los 2 modelos con elementos CSS8	48
4.3	Comparación de la evolución carga desplazamiento para los modelos con continuum solid shell frente al modelo con elementos S4 y los resultados experimentales	49
4.4	Campo de deformaciones ε_{xx} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo)	50
4.5	Campo de deformaciones ε_{xx} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo)	51
4.6	Campo de deformaciones ε_{yy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo)	52
4.7	Campo de deformaciones ε_{yy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo)	53
4.8	Campo de deformaciones ε_{xy} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo)	54
4.9	Campo de deformaciones ε_{xy} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo con elementos S4 (arriba), del modelo CSS8-Foot (centro) y del modelo CSS8-Web (abajo)	55
4.10	Campo de deformaciones ε_{zz} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo)	56
4.11	Campo de deformaciones ε_{zz} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo)	56
4.12	Campo de deformaciones ε_{xz} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo)	57
4.13	Campo de deformaciones ε_{xz} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo)	57
4.14	Campo de deformaciones ε_{yz} en el top de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo)	58
4.15	Campo de deformaciones ε_{yz} en el bottom de la skin, del foot stringer y del web stringer del modelo CSS8-Foot (arriba) y del modelo CSS8-Web (abajo)	58
4.16	Deformaciones ε_{xx} de las bandas JS01 y JS02 de los modelos con continuum solid shell y del modelo S4	59
4.17	Deformaciones ε_{xx} de las bandas JS11 y JS12 de los modelos con continuum solid shell y del modelo S4	59
4.18	Deformaciones ε_{xx} de las bandas JS13, JS14, JS15 y JS16 de los modelos con continuum solid shell y del modelo S4	59
4.19	Campo de tensiones σ_{11} en la lámina 19 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo CSS8-Web	61
4.20	Campo de tensiones σ_{22} en la lámina 18 de la skin (-45°) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web	62
4.21	Campo de tensiones σ_{12} en la lámina 15 de la skin (90°) y del web stringer (0°) del modelo CSS8-Web	62
4.22	Campo de tensiones σ_{13} en la lámina 16 de la skin (0°) y del web stringer (0°) del modelo CSS8-Web	62
4.23	Campo de tensiones σ_{23} en la lámina 3 de la skin (-45°), del foot stringer (90°) y del web stringer (90°) del modelo CSS8-Web	63
4.24	Campo de tensiones σ_{33} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web	63

4.25	En rojo, evolución de las tensiones σ_{33} a lo largo del espesor en el elemento debajo de la banda JS03 para el modelo CSS8-Web, y en azul el promedio de las tensiones σ_{33} en el modelo SC8R-Web	64
4.26	Campo de tensiones σ_{33} en la lámina 2 de la skin (0°) del modelo CSS8-Web	65
4.27	Campo de tensiones σ_{xz} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web	65
4.28	Campo de tensiones σ_{yz} en la lámina 2 de la skin (0°), del foot stringer (-45° izquierda y 45° derecha) y del web stringer (45°) del modelo CSS8-Web	65

Índice de Tablas

1.1	Propiedades de rigidez	9
1.2	Propiedades de rigidez obtenidos por hipótesis	9
1.3	Secuencias de apilado para las distintas partes del modelo	9
1.4	Propiedades de rigidez de las bandas del modelo	10
2.1	Máximas tensiones en el modelo con elementos S4	25
2.2	Máximas tensiones en el modelo con elementos S4R	25
3.1	Máximas tensiones en el modelo con elementos S4R (2º vez)	41
3.2	Máximas tensiones en el modelo SC8R-Foot	42
3.3	Máximas tensiones en el modelo SC8R-Web	42
4.1	Máximas tensiones en el modelo con elementos S4 (2º vez)	60
4.2	Máximas tensiones σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} en el modelo CSS8-Foot	60
4.3	Máximas tensiones σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} en el modelo CSS8-Web	60
4.4	Máximas tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} en el modelo CSS8-Foot	61
4.5	Máximas tensiones σ_{13} , σ_{23} y σ_{33} en el modelo CSS8-Web	61
5.1	Resumen resultados costes computacionales	68

